Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 13, No. 4, 2023, p. 405-426

Environmental Impact Assessment of Electricity Generation in Wind Power Plants (Case Study: Kahak Qazvin and Aqkand Miyaneh)

M. Nowroozipour[1], R. Tabatabaei koloor[2*], A. Motevali[2]

1- MSc Student in Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran
2- Associate Professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran
(*- Corresponding Author Email: r.tabatabaei@sanru.ac.ir)

Received: 11 April 2022 Revised: 30 May 2022 Accepted: 06 June 2022 Available Online: 11 June 2022	**How to cite this article:** Nowroozipour, M., Tabatabaei koloor, R., & Motevali, A. (2023). Environmental Impact Assessment of Electricity Generation in Wind Power Plants (Case Study: Kahak Qazvin and Aqkand Miyaneh). *Journal of Agricultural Machinery*, *13*(4), 405-426. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2022.76180.1102

Introduction

The world's growing population has led to an inevitable increase in energy demand, and this, in addition to the depletion of non-renewable energy sources, can lead to several environmental issues. Wind power has proven to be a reliable and sustainable source of electricity, particularly in light of the pressing need to mitigate environmental impact and promote the use of renewable energy. The purpose of this research is to investigate and compare the environmental effects of electricity production from two wind power plants, Aqkand and Kahak, using wind turbines with a capacity of 2.5 megawatts for a period of three different lifetimes (20, 25, and 30 years).

Materials and Methods

The present study investigates the environmental effects of electricity generation during the life cycle of wind farms (Kahak and Aqkand) during the construction and operation of these power plants and the cumulative exergy demand index. The specifications of the wind turbines used in the current research are: turbine capacity of 2.5 MW, rotor diameter of 103 meters, rotor weight of 56 tonnes, three blades, each blade is 50.3 meters long and weighs 34.8 tonnes. The turbines are manufactured by Mapna and used in dry conditions. A functional unit of one kilowatt of electricity was selected and the data were analyzed in SIMAPRO software using IMPACT2002+ method with 15 midpoint indicators and four final indicators.

Results and Discussion

The results showed that the stage of raw materials and production has the highest impact on the creation of midpoint indicators, which is due to extraction, manufacturing, and production of parts such as steel casting using non-renewable energy and activities such as high-temperature welding. The total environmental index of Aqkand and Kahak wind power plants for 1 kWh of generated electricity was 5.84 and 4.45 µPt respectively, more than half of which belongs to the damage to human health category. The investigation of the ionizing radiation index showed that the use of diesel fuel in the installation phase resulted in the highest amount of emissions in both of the power plants, so the share of pollutant emissions in the raw materials and production phase is more than 40%, and in the installation phase due to diesel fuel consumption was more than 48%. The investigation of the eutrophication index showed that the raw materials and production stage accounted for more than 95% of the damage to the ecosystem quality category, and in the meantime, copper and electrical components had the highest amount of contribution to the raw materials and production stage. Additionally, diesel fuel accounted for the largest part of the result in the installation stage, and the transportation and maintenance stage included less than 1% of this result. The investigation of the renewable energy consumption

https://doi.org/10.22067/jam.2022.76180.1102

index showed that the stage of raw materials and turbine production in the Aqkand power plant with a share of 68% and the Kahak power plant with a share of 70% had the greatest effect on the category of resource damage. Also, the installation and commissioning phase was the second most effective factor in the category of resource damage due to the use of diesel fuel. The study of the cumulative exergy demand index showed that non-renewable-fossil resources had the largest share in exergy demand (0.15 MJ) to produce one kilowatt of electricity generated from power plants.

Conclusion

In this study, the results showed that in both plants, about 70% of various respiratory effects, 60% of human health issues, and 25% of acidification and global warming are caused in the raw materials and manufacturing phase. Furthermore, the installation phase is responsible for 17% and 16% of climate change in the Aqkand and Kahak power plants respectively, and between 14% and 26% of other environmental factors.

Keywords: Cumulative exergy demand, Environmental impact, Iran, Wind energy

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۳، شماره ٤، زمستان ١٤٠٢، ص ٤٢٦-٤٠٥

ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسیته در نیروگاه بادی (مطالعه موردی: کهک قزوین و آقکند میانه)

ماریه نوروزی پور[۱]، رضا طباطبایی کلور[۲]*، علی متولی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۶

چکیده

روند رو به رشد جمعیت جهان، افزایش اجتناب‌ناپذیر تقاضای انرژی را به همراه داشته و این امر به غیر از پایان‌پذیر بودن منابع انرژی تجدیدناپذیر می‌تواند مشکلات فراوان زیست‌محیطی را به همراه داشته باشد. با توجه به اهمیت اثرات زیست‌محیطی و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از باد می‌تواند منبعی بسیار مطمئن برای تولید انرژی الکتریسته باشد. مطالعه حاضر به بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسیته در طول چرخه حیات نیروگاه‌های بادی (کهک و آقکند) در طول مراحل احداث تا بهره‌برداری این نیروگاه‌ها و شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی، پرداخته است. در مطالعه حاضر واحد کارکردی یک کیلووات الکتریسیته انتخاب شد و داده‌ها در نرم‌افزار سیماپرو به روش IMPACT2002+ در قالب ۱۵ شاخص میانی و چهار شاخص نهایی تحلیل شدند. نتایج نشان داد که مرحله مواد اولیه و تولید (از استخراج تا ساخت اجزا) بالاترین تاثیر را در ایجاد شاخص‌های میانی به همراه داشت که دلیل این امر استخراج، ساخت و تولید قطعات ازجمله ریخته‌گری فولاد با استفاده از انواع انرژی‌های تجدیدناپذیر و فعالیت‌هایی همچون جوشکاری در دمای بالا می‌باشد. همچنین میزان شاخص کل زیست‌محیطی دو نیروگاه بادی آقکند و کهک به‌ازای ۱ کیلووات ساعت الکتریسیته تولیدی به‌ترتیب برابر ۵/۸۴ و ۴/۴۵ (µPt) بود و از این مقدار به‌ترتیب ۳/۰۲ و ۲/۳۱ (µPt) مربوط به دسته خسارت سلامت انسان بود. همچنین بررسی شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی نشان داد که منابع تجدیدناپذیر-فسیلی بیشترین سهم در تقاضای اکسرژی (به میزان ۰/۱۵۳MJ) را به‌ازای تولید یک کیلووات الکتریسیته از نیروگاه‌های احداث شده به خود اختصاص دادند.

واژه‌های کلیدی: اثرات زیست‌محیطی، انرژی باد، ایران، تقاضای اکسرژی تجمعی

مقدمه

وابستگی به منابع انرژی تجدیدناپذیر، سرعت تخلیه این دست از انرژی‌ها را به دلیل افزایش اجتناب‌ناپذیر تقاضای جهانی انرژی تسریع می‌نماید. به‌غیر از پایان‌پذیر بودن انرژی‌های تجدیدناپذیر، با افزایش جمعیت کره زمین و تقاضای بیشتر برای انرژی، سایر مشکلات مرتبط با این منابع اعم از آلودگی هوا، بارش باران‌های اسیدی، گرم‌شدن کره زمین، تخریب لایه ازن، تخریب جنگل‌ها و انتشار مواد رادیواکتیو افزایش می‌یابد (Azarpour, Suhaimi, Zahedi, & Bahadori, 2013). یکی از راه‌حل‌های کمبود انرژی و وابستگی به منابع تجدیدناپذیر، افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر است (Amani & Hosseini Shamachi, 2009). علی‌رغم تلاش‌ها و برنامه‌ریزی‌ها برای کاهش مصرف انرژی، مصرف انرژی‌های اولیه در سال ۲۰۱۹ به میزان ۱/۳٪ کاهش یافت که کمتر از نیمی از نرخ سال ۲۰۱۸ (۲/۸٪) بود. بررسی‌ها نشان داد که مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان در سال ۲۰۱۹ نسبت به سال ۲۰۱۸ افزایش یافت و در مجموع به سمت توسعه این فناوری‌ها قدم برداشته شد (British, 2006). همچنین بررسی‌های انجام‌شده در ایران نشان داد که میزان برق تولیدی از منابع تجدیدپذیر در سال ۹۸ نسبت به سال ۹۷، ۵۴ درصد افزایش و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال ۹۸ نسبت به سال ۹۷، ۵۲ درصد کاهش داشت. مطابق آمار وزارت نیرو

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: r.tabatabaei@sanru.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2022.76180.1102

ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های تجدیدپذیر در کشور در سال ۹۸ نسبت به سال ۹۷، ۱۷ درصد رشد داشته به طوری که ظرفیت نیروگاه‌های بادی، فتوولتائیک و الکتریسیته آبی کوچک در سال ۹۸ نسبت به سال ۹۷، به‌ترتیب ۶ ، ۳۹ و ۱۷ درصد افزایش داشته است. نتایج مطالعات در مورد استفاده احتمالی از انرژی تجدیدپذیر در ایران نشان می‌دهد که هدف ۲۰۰۰۰ مگاوات در سال ۲۰۲۵ عملی می‌باشد (Statistical, 2019). باد یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر بوده و کشور ایران به‌عنوان کشوری دارای مناطق بادخیز فراوان، در صورت استفاده از منابع این انرژی، می‌تواند بخش عظیمی از انرژی‌های مورد نیاز خود را تامین کند (Motahari, Ahmadian, Abedi, & Ghaffarzadeh, 2014). حدود ۱٪ از تابش خورشیدی دریافت‌شده به دلیل گرادیان دما منجر به همرفت قابل‌توجه و در نتیجه به انرژی باد تبدیل می‌شود (Le Gourieres, 2014). فناوری باد به‌عنوان ظرفیتی جدید در سیستم‌های قدرت در سراسر جهان رشد کرده است (Billinton & Gao, 2008). بررسی‌ها نشان می دهد که ظرفیت اسمی انرژی باد در کشور حدود ۶۰۰۰۰ مگاوات می‌باشد که میزان انرژی تولیدی تا ۱۸۰۰۰ مگاوات قابل‌استحصال است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی پتانسیل بالای کشور در زمینه انرژی باد و به صرفه بودن سرمایه‌گذاری در این صنعت است (Aghahosseini, Bogdanov, Ghorbani, & Breyer, 2018). بررسی‌های زیست‌محیطی انجام شده در مورد انرژی باد نشان می‌دهد که مرحله‌ی تولید توربین و ساخت نیروگاه بادی، عامل مهم انتشار گازهای گلخانه‌ای در نیروگاه‌های بادی می‌باشد که درصد انتشار تجمعی گازهای گلخانه‌ای در حدود ۷۳–۹۰ درصد و بقیه مراحل که شامل بهره‌برداری و نگهداری، تخریب نیروگاه، حمل و نقل حدود ۱۰–۲۸ درصد را به خود اختصاص می‌دهد (Joseph, Lucille, & Bruce, 2000). اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید انرژی با استفاده از باد، توجه زیادی را در جهان به خود جلب کرده و به دلیل ارزیابی دقیق اثرات زیست‌محیطی توسط ارزیابی چرخه حیات، به‌طور گسترده از این روش در ارزیابی زیست‌محیطی استفاده می‌شود (Bidstrup, 2015). ارزیابی چرخه حیات یک روش مفید برای ارزیابی کمی اثرات زیست‌محیطی در طی یک فرایند، تولید یک محصول یا تکنولوژی، در سراسر مراحل مختلف چرخه حیات است که شامل جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل ورودی‌ها، خروجی‌ها و پیامدهای بالقوه زیست‌محیطی است (Standardization, 2006).

پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر با استفاده از دانش بومی به تولید فناوری‌ها و تجهیزات مختلف نیروگاه‌های بادی (تولید ژنراتورها، ناسل، برج و غیره) پرداخته شد و این تجهیزات در نیروگاه‌های کهک قزوین و آقکند میانه نصب شدند. یکی از دغدغه‌های مهم در این نیروگاه‌ها، میزان اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید انرژی الکتریسته در نیروگاه‌های بادی با استفاده فناوری‌های بومی می‌باشد.

در پژوهشی محققان به بررسی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در انواع مختلف نیروگاه‌های تولید الکتریسیته که شامل نیروگاه‌های هسته‌ای، نیروگاه‌های فتوولتائیک، نیروگاه‌های برق آبی، نیروگاه‌های بادی، نیروگاه‌های سوخت فسیلی بود، در قالب ارزیابی چرخه حیات (LCA[1]) پرداختند. نتایج نشان داد که نیروگاه‌های سوخت فسیلی دارای بیشترین و نیروگاه‌های هسته‌ای و برق آبی دارای کمترین مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای بودند (Al-Muhammad, & Piriaei, 2013). در پژوهشی به بررسی اثرات زیست‌محیطی توربین‌های بادی ۲ مگاواتی دارای ژنراتورهای دو سویه القایی مدرن (که بیشترین استفاده را در مزارع بادی دارند) پرداخته شد. بر این اساس، یک ارزیابی چرخه زیستی گسترده روی توربین باد اجرا شد که تمام مراحل ساخت تا برچیدن و فرآوری ضایعات در پایان عمر مفید آن را پوشش می‌داد. نتایج نشان داد که آلودگی دی‌اکسیدکربن بر کیلووات ساعت الکتریسیته تولید شده با افزایش توان نامی توربین کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که مقادیر آلودگی و اثرات زیست‌محیطی این انرژی، بسیار کمتر از سایر منابع تولید الکتریسیته است (Zare Thani & Nisari, 2016). در مطالعه‌ای دیگر به بررسی اثرات زیست‌محیطی نیروگاه بادی و برق آبی سفیدرود منجیل پرداخته شد. نتایج نشان داد که نیروگاه برق آبی منجیل نسبت به نیروگاه بادی دارای پیامدهای زیست‌محیطی بیشتری می‌باشد و در نیروگاه بادی، فاز احداث و در نیروگاه برق آبی فاز بهره‌برداری دارای بیشترین اثرات زیست‌محیطی است. همچنین نتایج نشان داد که انتشار آلاینده‌ها از توربین‌های بادی در زمان تولید الکتریسیته ناچیز بوده و در زمان ساخت توربین‌ها و احداث نیروگاه بادی نیز میزان انتشار آلاینده کم بوده است (Rezaei Kalaj & Oashk Sarai, 2014). در مطالعه‌ای دیگر اثرات‌زیست‌محیطی یک مزرعه بادی در کشور اتیوپی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که متوسط شاخص گرمایش جهانی در هر کیلووات ساعت الکتریسیته تولیدشده، برای تغییرات آب و هوایی ۳۳/۶ kg CO_2eq گرم بود. مقادیر تقاضای انرژی تجمعی (CED[2]) و بازگشت انرژی (EROI[3]) برای سیستم انرژی بادی به‌ترتیب ۰/۳۹۳ MJ و ۹/۲ بود (Teffera, Assefa, Björklund, & Assefa, 2021). در پژوهشی دیگر به ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید انرژی از باد و ذغال‌سنگ پرداخته شد. نتایج نشان داد که تولید انرژی با استفاده از باد اثرات زیست‌محیطی کمتری

1- Life Cycle Assessment
2- Cumulative Energy Demand
3- Energy Return on Investment

نسبت به انرژی ذغال‌سنگ دارد. با این حال، نتایج نشان داد که تولید انرژی از باد به زمینی با مساحت بسیار بیشتر از انرژی ذغال‌سنگ نیاز دارد (Moore, 2021). ارزیابی اثرات زیست‌محیطی دو نوع برج توربین بادی (lattice and tubular) با اندازه و ظرفیت تولید انرژی یکسان با کمک ارزیابی چرخه حیات صورت پذیرفت و نتایج نشان داد که میزان انتشار CO_2 با در نظر گرفتن چرخه حیات برج و پایه در برج lattice ۶۵٪ پایین‌تر بود (Stavridou, Koltsakis, & Baniotopoulos, 2020). در پژوهشی دیگر به تجزیه و تحلیل اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسیته از انرژی باد و ذغال‌سنگ در چین پرداخته شد. نتایج نشان داد که به‌ازای تولید هر کیلووات ساعت انرژی الکتریسیته، انرژی باد تنها ۴٪ از کل میزان انتشار دی‌اکسید کربن و هزینه‌های زیست‌محیطی مربوط به ذغال‌سنگ را ایجاد می‌کند (Li, Jiang, Dong, Wei, & Liao, 2020). در پژوهشی دیگر یک توربین بادی ۵ کیلوواتی با هدف توسعه توربین‌های بادی محور عمودی در مقیاس کوچک‌تر با دیدگاه کاهش تغییرات آب و هوایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اکثر اثرات زیست‌محیطی به جای خود توربین، مربوط به زیرساخت‌های پشتیبانی‌کننده، مانند دکل و پایه‌ها می‌باشد (Kouloumpis, Sobolewski, & Yan, 2020). در پژوهشی دیگر نتایج بررسی چرخه حیات برج‌های توربین بادی فولادی ترکیبی بلند و نصب‌شده در خشکی با ارتفاع ۱۸۵ متر، نشان داد که بیشترین اثرات زیست‌محیطی در مرحله تولید توربین و به دنبال آن مرحله نصب ایجاد می‌شود. برج با بیشترین میزان انتشار دی‌اکسیدکربن و مصرف انرژی همراه است (Gkantou, Rebelo, & Baniotopoulos, 2020). در پژوهشی دیگر به بررسی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای توربین‌های بادی نصب‌شده در خشکی و دریا با ظرفیت اسمی ۲ مگاوات پرداخته شد. نتایج نشان داد که شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای برای توربین بادی خشکی $0/082\ kg\ CO_2eq\ MJ^{-1}$ و برای توربین بادی دریایی $0/130\ kg\ CO_2eq\ MJ^{-1}$ بود. همچنین نتایج نشان داد که توربین‌های بادی خشکی و دریایی دارای شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای بسیار کمتری نسبت به نیروگاه‌های ذغال‌سنگ بودند (Wang *et al.*, 2019). در تحقیقی دیگر اثرات زیست‌محیطی سه فناوری الکتریسیته آبی، هسته‌ای و انرژی باد با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه حیات مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کمترین میزان پتانسیل گرمایش جهانی متعلق به انرژی باد ($28/6\pm3/2 gCO_2eq\ kWh^{-1}$) و در رتبه‌های بعدی انرژی هسته‌ای ($12/4\pm1/5\ gCO_2eq\ kWh^{-1}$) و برق آبی ($3/5\pm0/4\ gCO_2eq\ kWh^{-1}$) بود (Wang *et al.*, 2019). در پژوهشی دیگر به ارزیابی چرخه حیات ۲۰۰ توربین بادی (خرید مواد، ساخت، حمل و نقل، نصب، بهره‌برداری و نگهداری و پایان زندگی) مدل Gamesa 2-MW در تگزاس امریکا پرداخته شد. نتایج نشان داد که فاز تولید توربین بیشترین اثرات زیست‌محیطی را داشت. بررسی‌ها برای یک عمر ۲۰، ۲۵ و ۳۵ ساله نشان داد که توربین‌ها به‌ترتیب ۳/۴، ۴/۲ و ۵/۱ برابر بیشتر از انرژی مصرفی می‌توانند تولید انرژی داشته باشند (Alsaleh & Sattler, 2019). بررسی منابع صورت‌گرفته نشان داد که مطالعات زیادی به‌منظور ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسیته در نیروگاه‌های بادی خارج از کشور صورت گرفته است. بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در داخل کشور نیز نشان داد که تاکنون پژوهشی در ارتباط با ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسیته در نیروگاه‌های بادی انجام نشده است. از طرف دیگر پژوهش‌های انجام شده در سایر کشورها، بیشتر معطوف بر نیروگاه‌هایی بود که تجهیزات آن‌ها توسط شرکت‌های خارجی تولید شده است. از این رو در پژوهش حاضر، شاخص‌های زیست‌محیطی دو نیروگاه بادی داخل کشور که توسط شرکت‌های داخلی تولید و نصب شده است در بازه زمانی ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سال از منظر چرخه حیات و میزان انتشارات آلاینده‌های زیست‌محیطی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

موقعیت مطالعه

در مطالعه‌ی حاضر به ارزیابی چرخه حیات نیروگاه‌های بادی از مراحل احداث تا بهره‌برداری، در دو نیروگاه بادی واقع در کهک شهرستان قزوین و آقکند شهرستان میانه که توسط شرکت داخلی مپنا تولید و نصب گردیده بودند پرداخته شد. نیروگاه بادی کهک در استان قزوین با موقعیت جغرافیایی ۴۹ درجه و ۴۴ دقیقه و ۳۰ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۷ دقیقه و ۵۲ ثانیه عرض شمالی با وسعت چهار هزار و ۲۲۳ هکتار، توان تولید ۵۵ مگاوات الکتریسیته با به‌کارگیری ۲۲ عدد توربین ۲/۵ مگاواتی را دارا می‌باشد. همچنین نیروگاه بادی آقکند مجهز به ۲۰ توربین بادی ۲/۵ مگاواتی به ظرفیت مجموع ۵۰ مگاوات در منطقه آقکند از توابع شهرستان میانه واقع در استان آذربایجان شرقی با موقعیت جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳ دقیقه و ۵۳ ثانیه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه و ۲۴ ثانیه عرض شمالی با وسعت ۷۰۰ هکتار است.

تئوری تحقیق

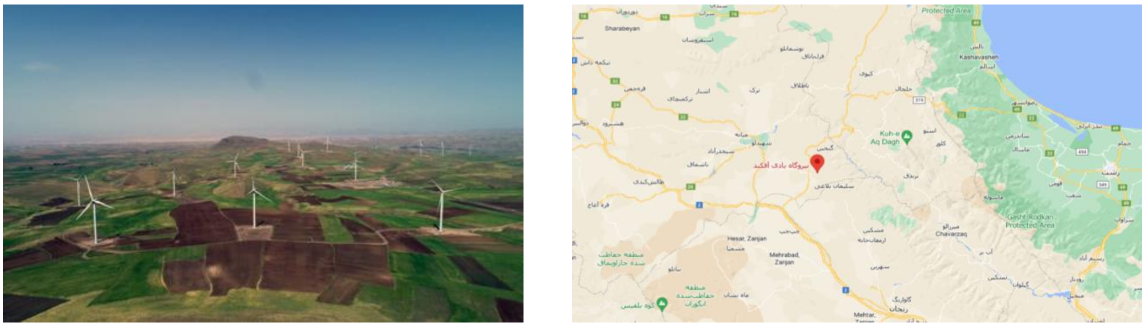
به‌منظور بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسته از نیروگاه‌های بادی مورد مطالعه در پژوهش حاضر از روش ارزیابی چرخه حیات استفاده شد (Standardization, 2006). چرخه حیات به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های بررسی اثرات زیست‌محیطی با گردآوری ورودی‌ها و خروجی‌ها و اثرات محیطی بالقوه در طول چرخه زندگی معرفی شده است و کل مراحل تولید از گهواره تا گور مورد

بررسی قرار می‌دهد.



شکل ۱– نیروگاه بادی کهک قزوین

Fig.1. Kahak wind power plant in Qazvin, Iran



شکل ۲– نیروگاه بادی آقکند میانه

Fig.2. Aqkend wind power plant in Miyaneh, Iran

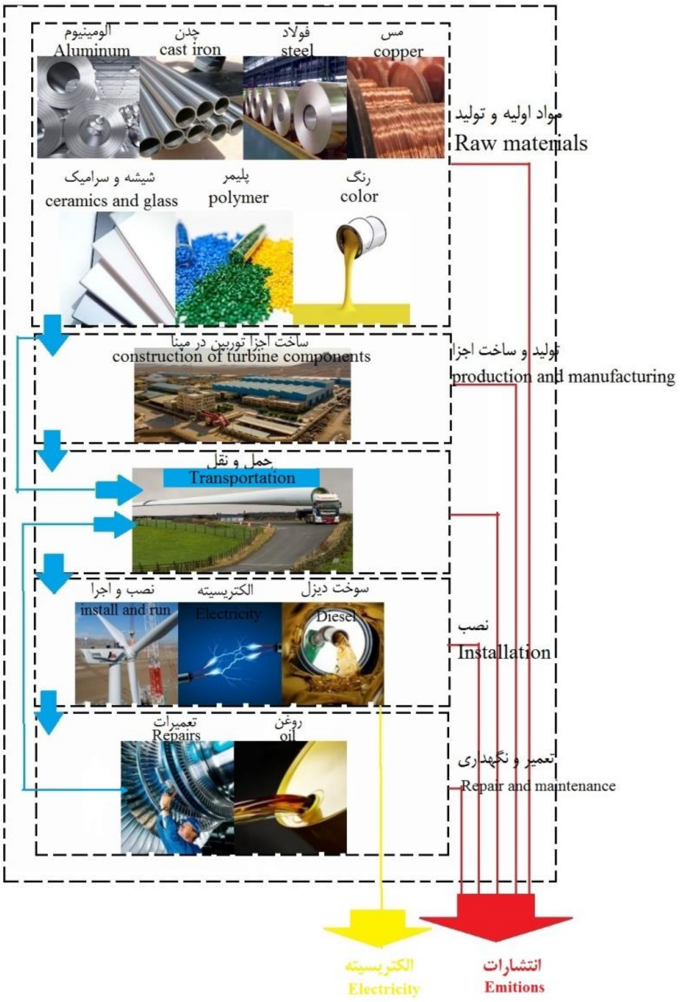
استخراج، فرآوری، ساخت‌وساز، تولید، دفع، نوسازی یا تخریب مراحلی هستند که در ارزیابی چرخه حیات تولید الکتریسیته مورد بررسی قرار می‌گیرند که مراحل نوسازی و تخریب بررسی نمی‌شود. ارزیابی چرخه حیات می‌تواند در مواردی مانند بررسی فرصت‌ها برای رسیدن به عملکرد زیست‌محیطی بهتر، افزایش آگاهی به تصمیم گیرندگان در صنایع گوناگون برای رسیدن به برنامه‌ریزی‌های بهتر، بازاریابی (هم‌چون اجرای یک طرح زیست‌محیطی) و برگزیدن شاخص‌ها در ارتباط با عملکرد زیست‌محیطی مانند فنون اندازه‌گیری یاری‌رسان باشد (Hendrickson, Lave, & Matthews, 2010).

براساس استاندارد ISO 2006، تجزیه و تحلیل چرخه حیات از ۴ مرحله تعریف هدف و محدوده، آنالیز داده‌ها (سیاهه)، ارزیابی اثرات و تفسیر تشکیل شده است (Guinée & Lindeijer, 2002). هدف از پژوهش حاضر بررسی و مقایسه اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسته از دو نیروگاه بادی آقکند و کهک با استفاده از فناوری داخلی (توربین‌های بادی با ظرفیت ۲/۵ مگاوات ساخت مپنا و استفاده شده در شرایط خشکی) در بازه زمانی ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سال بوده و واحد عملکردی در این پژوهش ۱ کیلووات ساعت الکتریسیته تولید شده از توربین‌ها در نظر گرفته شد. همچنین مرز سامانه در بررسی اثرات زیست‌محیطی در هر دو نیروگاه در شکل ۳ آورده شده است.

لازم به ذکر است که بررسی زمین و اکوسیستم (ایجاد مزاحمت برای زیست‌گاه گونه‌های در معرض خطر با نصب توربین‌ها) و اثرات مستقیم بر حیات‌وحش در طول عملیات توربین (به‌عنوان مثال برخورد پرندگان به پره‌های توربین) مورد مطالعه قرار نگرفته است. همچنین غیرقابل دسترس بودن داده‌های مرحله‌ی انهدام نیروگاه بادی به دلیل کمبود امکانات کشور در حوزه‌ی بازیافت فراتر از محدوده مورد مطالعه بود.

اجزا و مولفه‌های توربین ۲/۵ مگاواتی مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل ظرفیت توربین ۲/۵ مگاوات، قطر روتور ۱۰۳ متر، وزن روتور۵۶ تن، تعداد پره ۳ تا، طول پره ۵۰/۳ متر، وزن هر پره ۳۴/۸ تن، وزن ناسل ۹۳ تن، وزن تاور ۲۰۷ تن، ارتفاع هاب تاور ۸۵ متر، نوع ژنراتور DFIG[1] و وزن ژنراتور ۸/۷ تن بود. در جدول ۱ سهم مواد اولیه در تمام فرآیند احداث نیروگاه بادی آقکند و کهک به‌ازای واحد عملکردی ۱ کیلووات ساعت الکتریسته تولیدی آورده شده است.

1- Doubly Fed Induction Generator



شکل ۳– مرز سامانه برای تولید الکتریسیته در دو نیروگاه بادی آقکند و کهک

Fig.3. System boundary for electricity generation in Aqkend and Kahak wind power plants

ارزیابی اثرات چرخه حیات به دلیل رسیدن به هدف و دامنه مطالعه ارزیابی باید با دقت برنامه‌ریزی و با دیگر مراحل ارزیابی چرخه حیات در هماهنگی باشد تا از قلم‌افتادگی‌های ممکن و عدم‌قطعیت منابع مورد توجه قرار گیرد (Standardization, 2006). در این پژوهش، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی براساس روش Impact2002+ با ۱۵ شاخص میانی (مواد سرطان‌زا و غیر سرطان زا، مواد غیرآلی تنفسی، تابش یونیزه، تخریب لایه ازن، اثرات تنفسی، مسمومیت آبزیان، مسمومیت زمین، اسیدی شدن خاک، اشغال اراضی، مسمومیت آبی، اتروفیکاسیون، گرمایش جهانی، مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر و استخراج معادن) و ۴ رده آسیب (سلامتی انسان‌ها، کیفیت اکوسیستم، تغییرات اقلیم و منابع) برای محاسبه انتشارات آلاینده‌ها در احداث و بهره‌برداری نیروگاه بادی استفاده شد (Jolliet *et al.*, 2018). علاوه بر روش Impact2002+ برای بررسی اثرات زیست‌محیطی در سه عمر متفاوت از روش اکسرژی تجمعی در آیکون Single issue استفاده شد و به‌منظور بررسی اثرات برخی از ورودی‌ها مانند فولاد، چدن، دیزل، گاز طبیعی و غیره، از پایگاه داده‌ای ELCD[1] در نرم‌افزار سیماپرو ۹/۱ داده‌های مورد نظر استخراج گردید.

تفسیر نتایج شامل پیامدهای زیست‌محیطی براساس نتایج داده‌های چرخه حیات و ارزیابی تاثیر چرخه حیات می‌باشد. تفسیر نتایج می‌تواند میزان سهم انتشار هرکدام از انتشارات زیست‌محیطی را در هر فاز (مواد اولیه و تولید، احداث، حمل و نقل و نگهداری و تعمیرات) بررسی و مورد مقایسه قرار دهد و عوامل تاثیرگذار در ایجاد شاخص‌های سوء زیست‌محیطی و میزان تاثیرگذاری هر یک از نهاده‌های ورودی در ایجاد این شاخص‌ها را مشخص نماید.

1- European Reference Life Cycle Database

جدول ۱- سهم مواد اولیه احداث نیروگاه بادی آقکند و کهک به ازای واحد عملکردی ۱ کیلو وات ساعت

Table 1- Share of raw materials used in the construction of Aqkend and Kahak wind power plants per 1 kWh operating unit

	مواد Materials	واحد Unit	آقکند Aqkend ۲۰ سال 20 Years	آقکند Aqkend ۲۵ سال 25 Years	آقکند Aqkend ۳۰ سال 30 Years	کهک Kahak ۲۰ سال 20 Years	کهک Kahak ۲۵ سال 25 Years	کهک Kahak ۳۰ سال 30 Years
مواد اولیه و تولید Raw materials and production	فولاد کم آلیاژ Low-alloy steel	kg	1.43E-03	1.14E-03	9.52E-04	1.12E-03	8.93E-04	7.45E-04
	فولاد آلیاژ سنگین Chromium alloy steel	kg	2.52E-04	2.02E-04	1.68E-04	1.94E-04	1.55E-04	1.29E-04
	چدن Cast iron	kg	1.93E-04	1.54E-04	1.28E-04	1.48E-04	1.19E-04	9.88E-05
	مس Copper	kg	2.77E-05	2.22E-05	1.85E-05	2.18E-05	1.74E-05	1.45E-05
	الومینیوم Aluminium	kg	7.66E-05	6.13E-05	5.10E-05	5.84E-05	4.67E-05	3.89E-05
	پلیمر Polymer	kg	1.99E-04	1.59E-04	1.33E-04	1.53E-04	1.23E-04	1.02E-04
	بتن Concrete	kg	6.56E-03	5.25E-03	4.38E-03	5.05E-03	4.04E-03	3.37E-03
	سرامیک و شیشه Ceramics and glass	kg	1.09E-04	8.69E-05	7.24E-05	8.40E-05	6.72E-05	5.60E-05
	رنگ Color	kg	7.31E-08	5.85E-08	4.88E-08	5.64E-08	4.51E-08	3.76E-08
	قطعات الکتریکی Electrical components	kg	1.31E-05	1.05E-05	8.76E-06	1.02E-05	8.16E-06	6.80E-06
تعمیر و نگهداری Repair and maintenance	روغن Oil	kg	1.03E-04	1.42E-04	1.41E-04	1.65E-05	1.32E-05	1.10E-05
نصب Installation	دیزل Diesel	kg	3.59E-04	2.88E-04	2.40E-04	2.77E-04	2.21E-04	1.85E-04
	الکتریسیته Electricity	kWh	2.06E-03	1.65E-03	1.37E-03	1.44E-03	1.15E-03	9.60E-04
کل حمل‌ونقل Total transport	حمل‌ونقل Transportation	tkm	1.43E-03	1.39E-03	1.25E-03	2.09E-03	1.67E-03	1.39E-03

شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی

اکسرژی سامانه، بیشترین کار مفید ممکن طی یک فرآیند، پتانسیل سامانه برای ایجاد یک تغییر و انرژی موجود برای استفاده در زمان تعادل این سامانه با محیط است. شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی به‌عنوان مجموع اکسرژی تمامی منابع مورد نیاز جهت تولید یک محصول و یا فراهم آوردن یک خدمت بیان می‌شود (Dewulf *et al.*, 2007). شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی به هشت زیرگروه منابع فسیلی، هسته‌ای، آبی، زیست‌توده، سایر انرژی‌های تجدیدپذیر، آب، مواد معدنی و فلزات تقسیم می‌شود (Bösch, Hellweg, Huijbregts, & Frischknecht, 2007). در این مطالعه احداث و بهره‌برداری نیروگاه بادی از لحاظ شاخص تقاضای اکسرژی در رده‌های اثر منابع تجدیدناپذیر-فسیلی، منابع تجدیدناپذیر-مواد معدنی، منابع تجدیدناپذیر-فلزات، منابع تجدیدپذیر-پتانسیل، منابع تجدیدپذیر آب، منابع تجدیدناپذیر اولیه مورد بررسی قرار گرفت. هدف بررسی تقاضای اکسرژی در احداث و بهره‌برداری نیروگاه‌های بادی براساس نهاده‌های مصرفی بود و واحد کارکردی برای محاسبات اکسرژی در احداث نیروگاه بادی، یک کیلووات ساعت در نظر گرفته شد. مرزهای سامانه مشابه با مرزهای سامانه در مطالعه ارزیابی چرخه حیات در نظر

گرفته شد. منابع استفاده شده با توجه به واحد کارکردی و مرز سامانه تعیین گردید و در نهایت تحلیل سیاهه با توجه به اطلاعات ورودی‌ها و خروجی‌های فیزیکی فرآیندهای سامانه‌ها (مشابه با مطالعات ارزیابی چرخه حیات)، تهیه شد. به دلیل نبود اطلاعات کافی در رابطه با تقاضای اکسرژی در تولید الکتریسیته از نیروگاه بادی، از اطلاعات موجود در پایگاه داده اکواینونت موجود در نرم‌افزار سیماپرو استفاده شد.

نتایج و بحث

انتشارات مستقیم نیروگاه‌ها

نتایج آلاینده‌های مستقیم (انتشارات مستقیم از نیروگاه‌های بادی در مراحل مختلف ساخت، بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری) در دو نیروگاه آقکند و کهک در جدول ۲ بیان گردید.

جدول ۲– انتشارات زیست‌محیطی در کل مراحل چرخه حیات در دو نیروگاه بادی آقکند و کهک به‌ازای تولید یک کیلووات ساعت الکتریسیته در طول سه عمر مختلف با روش Impact2002 در نرم‌افزار سیماپرو

Table 2- Environmental pollutant emissions in all stages of the life cycle of Aqkand and Kahak power plants for the production of one kilowatt hour of electricity in three lifetimes using Impact2002 in SIMAPRO software

انتشارات Emissions	واحد Unit	آقکند Aqkend			کهک Kahak		
		۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years	۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years
آلومینیوم Aluminium	kg	1.22E-06	9.79E-07	8.17E-07	9.47E-07	7.58E-07	6.31E-07
آرسنیک Arsenic	kg	1.89E-08	1.52E-08	1.27E-08	1.48E-08	1.18E-08	9.87E-09
بنزن Benzene	kg	6.21E-07	4.99E-07	4.17E-07	4.81E-07	3.85E-07	3.21E-07
کربن دی‌اکسید Carbon dioxide	kg	9.53E-04	7.81E-04	6.58E-04	7.27E-04	5.82E-04	4.85E-04
دی‌سولفید کربن Carbon disulfide	kg	3.04E-07	2.44E-07	2.04E-07	2.38E-07	1.91E-07	1.59E-07
مونوکسید کربن، فسیل Carbon monoxide, fossil	kg	8.53E-05	6.84E-05	5.71E-05	6.63E-05	5.30E-05	4.42E-05
کلر Chlorine	kg	1.24E-08	1.03E-08	8.77E-09	9.29E-09	7.43E-09	6.19E-09
کروم Chromium	kg	3.97E-07	3.18E-07	2.65E-07	3.08E-07	2.46E-07	2.05E-07
کرومVI Chromium VI	kg	9.96E-09	7.97E-09	6.64E-09	7.72E-09	6.18E-09	5.15E-09
مس Copper	kg	6.71E-08	5.41E-08	4.52E-08	5.35E-08	4.28E-08	3.57E-08
مونوکسید دینیتروژن Dinitrogen monoxide	kg	3.73E-07	3.01E-07	2.52E-07	282E-07	2.26E-07	1.88E-07
اتان Ethane	kg	3.41E-07	2.77E-07	2.32E-07	2.62E-07	2.09E-07	1.75E-07
اتان، ۱، ۲-dichloro-1، 1، 2، 2-tetrafluoro-، cfc-114 Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	kg	-8.56E-12	-7.22E-12	-6.16E-12	-6.81E-12	-5.45E-12	-4.54E-12
فرمالدئید Formaldehyde	kg	5.41E-08	4.36E-08	3.65E-08	4/.8E-08	3.35E-08	2./9E-08
کلرید هیدروژن Hydrogen chloride	kg	1.09E-06	8.75E-07	7.31E-07	7.96E-07	6.36E-07	5.30E-07
فلوراید هیدروژن Hydrogen fluoride	kg	1.92E-07	1.54E-07	1.29E-07	1.44E-07	1.15E-07	9.60E-08

سولفید هیدروژن Hydrogen sulfide	kg	6.40E-08	5.16E-08	4.31E-08	4.95E-08	3.96E-08	3.30E-08
سرب Lead	kg	6.42E-08	5.15E-08	4.30E-08	5.02E-08	4.02E-08	3.35E-08
جیوه Mercury	kg	4.80E-10	3.86E-10	3.23E-10	3.63E-10	2.91E-10	2.42E-10
متان، -Bromochlorodifluoro، Halon 1211 Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	kg	1.36E-11	1.13E-11	9.56E-12	1.01E-11	8.08E-12	6.73E-12
متان، -Bromotrifluoro، Halon 1301 Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	kg	5.55E-11	4.79E-11	4.12E-11	4.10E-11	3.28E-11	2.73E-11
متان، -Chlorodifluoro، HCFC-22 Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	kg	1.75E-09	1.40E-09	1.17E-09	1.36E-09	1.09E-09	9.06E-10
متان، -dichlorodifluoro، cfc-12 Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	kg	3.57E-12	2.87E-12	2.39E-12	2.76E-12	2.21E-12	1.84E-12
متان، فسیل Methane, fossil	kg	3.68E-05	2.97E-05	2.49E-05	2.74E-05	2.20E-05	1.83E-05
متان، Tetrafluoro، CFC-14 Methane, tetrafluoro-, CFC-14	kg	7.17E-09	5.74E-09	4.79E-09	5.47E-09	4.38E-09	3.65E-09
نیترات Nitrate	kg	5.38E-10	4.60E-10	3.94E-10	5.16E-10	4.13E-10	3.44E-10
اکسید نیتروژن Nitrogen oxides	kg	2.26E-05	1.84E-05	1.54E-05	1.70E-05	1.36E-05	1.13E-05
PAH، هیدروکربن‌های آرومات یک چند حلقه‌ای PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	kg	1.34E-08	1.08E-08	8.97E-09	1.02E-08	8.17E-09	6.81E-09
ذرات، <۲،۵ Particulates, < 2.5 um	kg	2.10E-05	1.70E-05	1.42E-05	1.61E-05	1.29E-05	1.08E-05
ذرات، > um۲،۵ ، و <um۱۰ Particulates, > 2.5 um, and < 10um	kg	1.25E-05	1.00E-05	8.38E-06	9.73E-06	7.79E-06	6.49E-06
فسفر Phosphorus	kg	2.80E-09	2.39E-09	2.05E-09	2.03E-09	1.62E-09	1.35E-09
دی‌اکسید گوگرد Sulfur dioxide	kg	3.01E-05	2.45E-05	2.05E-05	2.20E-05	1.76E-05	1.47E-05
سولفور هگزافلوئید Sulfur hexafluoride	kg	1.36E-09	1.10E-09	9.17E-10	9.99E-10	799E-10	6.66E-10
تولوئن Toluene	kg	4.78E-08	3.99E-08	3.38E-08	3.54E-08	2.83E-08	2.36E-08
زایلن Xylene	kg	5.48E-08	4.50E-08	3.79E-08	4.03E-08	3.22E-08	2.69E-08
روی Zinc	kg	5.89E-08	4.75E-08	3.97E-08	4.60E-08	3.68E-08	3.06E-08

جدول ۳ انتشارات آلاینده در اثر مصرف سوخت دیـزل در فرآینـد ساخت پروژه نیروگاه‌های بادی آقکنـد و کهـک را بـرای تولیـد یـک مگاژول انرژی در طول دوره ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سـال را نشـان مـی‌دهـد. بررسی‌ها نشان می‌دهد افزایش عمر نیروگاه‌ها سبب کاهش انتشارات سوخت دیزل می‌گردد.

جدول ۳- کل انتشارات مصرف سوخت دیزل برای تولید ۱ مگاژول انرژی

Table 3- Diesel fuel burning emissions per 1 MJ of produced energy (Saber, Esmaeili, Pirdashti, Motevali, & Nabavi-Pelesaraei, 2020)

Emissions انتشارات (gM^{-1}Diesel)	آقکند Aqkend			کهک Kahak		
	۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years	۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years
Carbon dioxide	1.19E+03	1.16E+03	1.04E+03	1.74E+03	1.39E+03	1.16E+03
Sulfur dioxide	3.85E-01	3.75E-01	3.37E-01	5.64E-01	4.51E-01	3.76E-01
Methane	4./2E-02	4.79E-02	4.31E-02	7.21E-02	5.77E-02	4.81E-02
Benzene	2.78E-03	2.71E-03	2.43E-03	4.07E-03	3.26E-03	2.71E-03
Cadmium	3./2E-06	3.72E-06	3.34E-06	5.59E-06	4.47E-06	3.73E-06
Chromium	1.90E-05	1.85E-05	1.66E-05	2.78E-05	2.23E-05	1.86E-05
cuprum	6.49E-04	6.31E-04	5.68E-04	9.50E-04	7.60E-04	6.33E-04
Nitrogen dioxide	4.57E-02	4.45E-02	4.00E-02	6.69E-02	5.35E-02	4.46E-02
Nickel	2.67E-05	2.60E-05	2.34E-05	3.91E-05	3.13E-05	2.61E-05
Zinc	3.82E-06	3.72E-06	3.34E-06	5.59E-06	4.47E-06	3.73E-06
Benzo(a)pyrene	1.14E-05	1.11E-05	1.00E-05	1.68E-05	1.34E-05	1.12E-05
Ammonia	7.62E-03	7.42E-03	6.67E-03	1.12E-02	8.93E-03	7.44E-03
Selenium	3.82E-06	3.72E-06	3.34E-06	5.59E-06	4.47E-06	3.73E-06
Polycyclic aromatic hydrocarbon	1.25E-03	1.22E-03	1.10E-03	1.84E-03	1.47E-03	1.22E-03
Hydro carbon	1.09E+00	1.06E+00	9.51E-01	1.59E+00	1.27E+00	1.06E+00
Nitrogen oxides	1.69E+01	1.65E+01	1.48E+01	2.8E+01	1.98E+01	1.65E+01
Carbon Monoxide	2.40E+00	2.33E+00	2.10E+00	3.51E+00	2.81E+00	2.34E+00
Particulates(<2.5µm)	1.71E+00	1.66E+00	1.50E+00	2.50E+00	2.00E+00	1.67E+00

بررسی اثرات زیست‌محیطی

بررسی شاخص‌های میانی زیست‌محیطی در روش IMPACT2002+ برای تولید یک کیلووات انرژی الکتریسته در نیروگاه‌های بادی آقکند و کهک نشان داد که اکثر این شاخص‌ها (به‌جز تابش یونیزه) به شدت تحت تاثیر تولید مواد اولیه هستند. همچنین بررسی‌ها نشان داد که نصب و راه‌اندازی دومین عامل ایجاد آلاینده‌های زیست‌محیطی بود. یکی از دلایل مهم اثرگذار بودن تولید مواد اولیه برای راه‌اندازی نیروگاه‌ها در ایجاد شاخص‌های مختلف، استفاده بسیار زیاد از عناصری مانند فولاد، مس و غیره می‌باشد. بررسی موردی دو شاخص مواد سرطان‌زا و غیرسرطان‌زا نشان داد که بیش از ۹۶٪ از سهم ایجاد شاخص سرطان‌زایی مربوط به فولاد کم آلیاژ و بیش از ۹۱٪ از سهم ایجاد شاخص غیرسرطان‌زایی متاثر از مس بود. تولید آهن و آلیاژهای مرتبط با آن از تبدیل سنگ آهن در یک کوره انفجاری شروع می‌شود. آهن تولیدی استفاده محدودی دارد و اکثر آن به یک آسیاب فولادی می‌رسد که با کاهش محتوای کربن و با افزایش عناصر دیگر مانند منگنز و نیکل به آلیاژهای فولادی مختلف تبدیل می‌شود. باید توجه داشت که در صنایع فولاد، استفاده از سوخت ذغال‌سنگ به‌عنوان یکی از منابع انرژی بسیار رایج است. سوزاندن ذغال‌سنگ آلاینده‌های فراوانی از جمله گاز کوره ذغال‌سنگ، نفتالین، ترکیبات آمونیوم، روغن خام، گرد و غبار گوگرد و ذغال‌سنگ را از کوره‌ها به هوا منتشر می‌کند. نتایج بررسی اثرات زیست‌محیطی در دو نیروگاه بادی احداث‌شده در خشکی و دریا در ایالت تگزاس آمریکا نشان داد که جایگزین نمودن گاز طبیعی به جای سوخت ذغال‌سنگ بر دسته‌های تاثیر زیست‌محیطی اثر قابل‌توجهی نداشت (Chipindula, Botlaguduru, Du, Kommalapati, & Huque, 2018). نتایج بررسی پژوهشگران مختلفی مانند سو و همکاران (Xu, Pang, Zhang, Poganietz, & Marathe, 2018) نشان داد که فولاد و مس و به‌عبارتی مرحله تولید مواد اولیه از موثرترین عوامل در افزایش اثر محیطی (چندین اثر مختلف) می‌باشند. نتایج تحقیق هاپالا و پرمپریدا (Haapala & Prempreeda, 2014) نشان داد که مرحله تولید مواد اولیه و ساخت توربین بیش از ۷۸٪ و نتایج تحقیق چیپیندلا و همکاران (Chipindula *et al.*, 2018) نیز نشان داد که مرحله تولید مواد اولیه بیش از ۷۲٪ از اثرات زیست‌محیطی در شاخص‌های میانی را تشکیل می‌دهند.

بررسی شاخص تابش یونیزه نشان داد که استفاده از سوخت دیزل در مرحله نصب در هر دو نیروگاه مورد بررسی بالاترین میزان انتشارات را به همراه داشت به طوری که سهم انتشارات آلاینده‌ها در مرحله مواد اولیه و تولید بیش از ۴۰ درصد و در مرحله نصب به دلیل

مصرف سوخت دیزل بیش از ۴۸ درصد بود. از طرفی در نیروگاه کهک به دلیل رفت وآمدهای بیشتر در احداث نیروگاه، پیامد تابش یونیزه در مرحله حمل‌ونقل نیروگاه کهک (۱/۱۸E-۰۳ BqC-14eq) بیشتر از نیروگاه آقکند (۸/۰۵E-۰۴ BqC-14eq) بود. بررسی‌ها نشان داد که میزان حمل‌ونقل و به دنبال آن مصرف سوخت دیزل یکی از موثرترین عوامل در ایجاد شاخص تابش یونیزه بود. یکی از دلایل مهم این وضعیت این است که احتراق سوخت دیزل سبب تولید گرما و انتشار آلاینده‌ها شده و سبب تخریب لایه ازن می‌شود و به‌واسطه آن تابش‌هایی با قابلیت یونیزاسیون بیشتری به سطح زمین می‌رسد. وسایل نقلیه بر پایه سوخت دیزل، مقادیر زیادی NOx[1] تولید کرده که به تشکیل دود کمک می‌کنند. برخلاف نیروگاه‌های الکتریکی، که NOx را با استفاده از کنترل کاتالیزوری انتخابی یا کنترل کاتالیزوری غیرانتخابی حذف می‌کنند، خودروهای دیزلی معمولاً هیچ کنترلی برای حذف این گاز ندارند. استفاده از دیزل طی فرآیند احداث نیروگاه سبب ایجاد ترکیبی از واکنش‌های پیچیده مواد شیمیایی مانند دی‌اکسید گوگرد و اکسید نیتروژن می‌شود و این امر منجر به تخریب لایه ازن می‌گردد (Chipindula *et al.*, 2018). نتایج بررسی گلریا و همکاران (Guleria, Bhushan, Guleria, Bhushan, & Dulari, 2019) نشان داد که قرار گرفتن در معرض تابش‌های یونیزه باعث ایجاد ناهنجاری‌های شدید در انسان‌ها از قبیل آسیب DNA[2]، سرطان، ناباروری، حساسیت الکتریکی و غیره می‌شود که البته با توجه به گروه سنی انسان‌ها شدت متفاوتی دارد و در این زمینه کودکان و جنین، به دلیل داشتن سیستم ایمنی نابالغ، در معرض بیشترین آسیب هستند. همچنین بررسی‌ها نشان داد که اثرات تخریب لایه ازن بر سلامت انسان ناشی از افزایش اشعه فرابنفش خورشیدی (UV-R) به سطح زمین است. اشعه فرابنفش ناشی از خورشیدی دارای اثرات مضر زیادی بر سلامت پوست، چشم و غیره انسان است (Solomon, 2008).

بررسی اثرات زیست‌محیطی در دسته‌های میانی و در شرایط عمر مختلف نیروگاه‌ها

بررسی‌های زیست‌محیطی انجام‌شده در طول دوره ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سال از احداث یک نیروگاه بادی به‌ازای تولید یک کیلووات انرژی الکتریسته (جدول ۴) نشان داد که مرحله تولید مواد اولیه و احداث نیروگاه دارای بالاترین اثرات زیست‌محیطی بودند. در هر سه دوره مورد بررسی، اثرات زیست‌محیطی برای تمام مراحل به‌جز حمل‌ونقل و عملیات تعمیر و نگهداری کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن بود که با افزایش طول عمر نیروگاه‌ها، تجهیزات فرسوده‌تر شده و نیاز به سرویس، نگهداری و تعمیرات بیشتری وجود دارد. از طرف دیگر با افزایش طول عمر نیروگاه‌ها، آلاینده‌های تولیدی طی سال‌های بیشتری توزیع شده و در نهایت سهم مواد اولیه و احداث در میزان شاخص‌های میانی به‌طور جزیی کاهش می‌یابد. مرحله تعمیر و نگهداری شامل تعویض روغن، روغن‌کاری دنده‌ها و ژنراتور و تعمیر توربین‌ها در هنگام خرابی است. معمولا سازنده‌ها توصیه می‌کنند توربین‌ها را هر ساله روغن‌کاری کنید. هر توربین در هر بار روغن‌کاری ۳۷۵ کیلوگرم معادل ۴۰۰ لیتر روغن روان‌کننده مصرف می‌کند (Konstantinos *et al.*, 2014). با توجه به این‌که با افزایش طول عمر میزان نیاز به نگهداری نیز افزایش می‌یابد، بنابراین مقدار روغن مصرفی با افزایش طول عمر نیروگاه بیشتر می‌شود. با توجه به توصیه اکثر کارخانه‌های سازنده، توربین‌های بادی، به‌طور متوسط در طول عمر ۲۰ سال هر شش ماه یکبار و در عمر بیش از ۲۰ سال هر سه تا شش ماه یکبار نیازمند روغن‌کاری هستند. با افزایش عمر نیروگاه شاخص‌های تابش یونیزه، انرژی‌های تجدیدناپذیر و گرمایش جهانی دارای افزایش چشم‌گیری بودند و این اختلاف نتیجه‌ی افزایش تعمیر و نگهداری و حمل‌ونقل با افزایش سال‌های عمر نیروگاه است. با این حال این اثرات در مقابل اثرات زیست‌محیطی مرحله تولید ناچیز بوده و با طولانی‌تر شدن عمر نیروگاها، آلاینده‌های تولیدی بین سال‌های عمر توزیع شده و مقادیر متوسط آن‌ها کاهش می‌یابد. بررسی نتایج بازسازی مزارع بادی نشان داد که افزایش طول عمر و تولید الکتریسیته از این نیروگاه‌ها نسبت به سایر انرژی‌های تولیدی مزایای زیست‌محیطی را به دنبال دارد. بنابراین افزایش تعمیر و نگهداری جهت افزایش طول عمر نیروگاه برای مزارعی که نزدیک به پایان عمر مفید خود هستند می‌تواند یک گزینه مفید و موثر در کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی در فرآیند تولید انرژی باشد (Martínez, Latorre-Biel, Jiménez, Sanz, & Blanco, 2018).

ارزیابی دسته خسارت‌ها

سلامت انسان‌ها

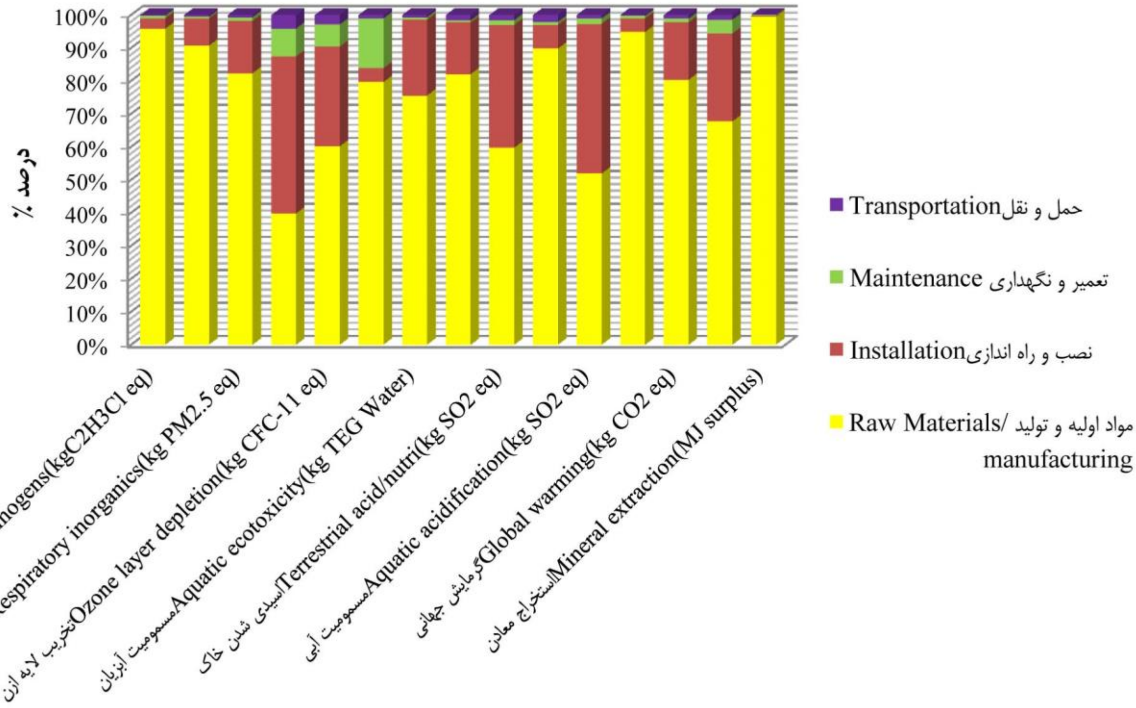
بررسی شاخص سلامت انسان‌ها به‌ازای تولید یک کیلووات ساعت انرژی الکتریسیته در دو نیروگاه آقکند و کهک نشان داد که کمترین میزان اثر بر روی سلامت انسان‌ها در نیروگاه آقکند مربوط به فرآیند حمل‌ونقل به میزان ۱/۴۷E-۱۰ DALY[3] بود، در حالی‌که در نیروگاه کهک، کمترین اثر روی سلامت انسان‌ها مربوط به فرآیند نگهداری و تعمیرات به میزان ۸/۲۶E-۱۲ DALY محاسبه شد.

1- Nitrogen Oxides

2- Deoxyribonucleic Acid

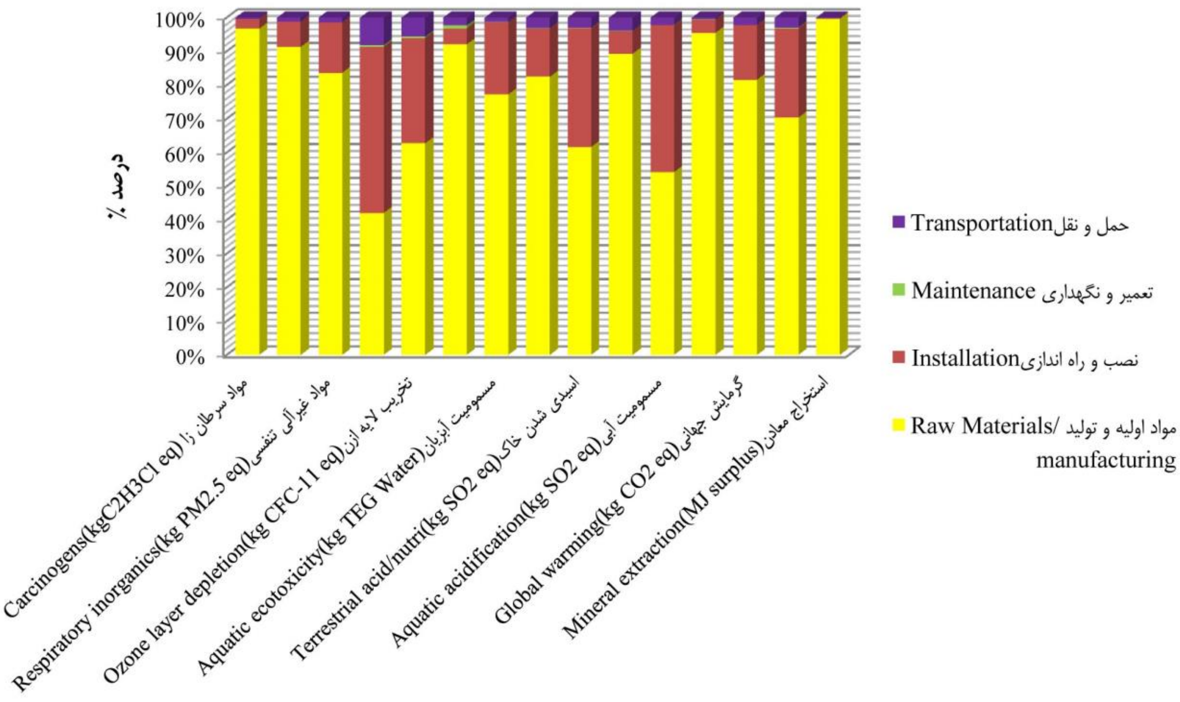
3- Disability-Adjusted Life Years (DALY)

دالی سال‌های زندگی با ناتوانی تعدیل‌شده می‌باشد. انتشار ۱ دالی برابر است با: نداشتن ۱ سال زندگی ۱ شخص، یا ۱ نفر ۴ سال از ناتوانی با وزن ۰/۲۵ رنج می‌برد.



شکل ٤- سهم اثرات زیست‌محیطی در تولید الکتریسیته نیروگاه بادی آقکند در طول عمر ۲۰ سال

Fig.4. Contribution of environmental effects in electricity generation of Aqkand wind power plant during the life of 20 years



شکل ۵- سهم اثرات زیست‌محیطی در تولید الکتریسیته نیروگاه کهک در طول عمر ۲۰ سال

Fig.5. Contribution of environmental effects in electricity generation of Kahak wind power plant during the life of 20 years

جدول ٤- شاخص‌های زیست‌محیطی در دسته‌های میانی در طول عمر مختلف نیروگاه‌ها

Table 4- Midpoint environmental categories and values for different lifetimes

شاخص میانی Midpoint categories	واحد Unit	آقکند Aqkend			کهک Kahak		
		۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years	۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years
مواد سرطان‌زا Carcinogens	kg C_2H_3Cleq	4.25E-04	3.42E-04	2.86E-04	3.26E-04	2.61E-04	2.17E-04
مواد غیرسرطان‌زا Non-carcinogens	kg C_2H_3Cleq	6.39E-04	5.14E-04	4.29E-04	4.94E-04	3.95E-04	3.29E-04
مواد غیرآلی تنفسی Respiratory inorganics	kg PM2/5eq	2.63E-05	2.13E-05	1.78E-05	2.01E-05	1.61E-05	1.34E-05
تابش یونیزه Ionizing radiation	Bq C-14 eq	1.96E-02	1.70E-02	1.47E-02	1.44E-02	1.15E-02	9.62E-03
تخریب لایه ازن Ozone layer depletion	kg CFC-11eq	8.60E-10	7.32E-10	6.27E-10	6.39E-10	5.11E-10	4.26E-10
تاثیرات تنفسی Respiratory organics	kg C_2H_4eq	7.83E-06	7.11E-06	6.24E-06	5.26E-06	4.21E-06	3.50E-06
مسمومیت آبزیان Aquatic ecotoxicity	kg TEG Water	2.66E+00	2.15E+00	1.80E+00	2.03E+00	1.62E+00	1.35E+00
مسمومیت زمین Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	8.61E-01	6.96E-01	5.82E-01	6.66E-01	5.33E-01	4.44E-01
اسیدی شدن خاک Terrestrial acidification	kg SO_2eq	1.67E-04	1.6E-04	1.14E-04	1.25E-04	1.00E-04	8.35E-05
اشغال اراضی Land occupation	M2org.arable	5.86E-04	4.75E-04	3.98E-04	4.59E-04	3.67E-04	3.06E-04
مسمومیت آبی Aquatic contamination	kg SO_2eq	4.89E-05	3.98E-05	3.34E-05	3.62E-05	2.89E-05	2.41E-05
اتروفیکاسیون Aquatic eutrophication	kg PO4P-lim	8.48E-06	6.83E-06	5.71E-06	6.59E-06	5.27E-06	4.39E-06
گرمایش جهانی Global warming	kg CO_2eq	1.21E-02	9.80E-03	8.21E-03	9.24E-03	7.39E-03	6.16E-03
مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر Non-renewable energy	MJ primary	1.52E-01	1.26E-01	1.07E-01	1.13E-01	9.02E-02	7.52E-02
استخراج معادن Mineral extraction	MJ surplus	5.38E-03	4.31E-03	3.59E-03	4.19E-03	3.35E-03	2.79E-03

دلیل این امر آن بود که انتقال برخی از اجزا نیروگاه کهک از مبدا اصفهان و بندرعباس به مقصد کهک قزوین بوده و افزایش میزان مصرف سوخت دیزل، اثر بیشتری روی دسته‌ی سلامت انسان گذاشته است. همچنین بالاترین میزان اثرات زیست‌محیطی بر روی سلامتی انسان‌ها در نیروگاه آقکند مربوط به مواد اولیه و تولید به میزان DALY ۱/۸۰E-۰۸ و در نیروگاه کهک DALY ۱/۳۹E-۰۸ بود. مرحله تولید مواد اولیه شامل فرایندهای پیچیده می‌باشد، به‌عنوان مثال برج بزرگ‌ترین قسمت در نیروگاه‌های بادی بوده و کاملاً از فولاد پوشیده شده و از روی ساخته شده است. ساخت برج یک فرایند دشوار است، زیرا قطر آن هرچه از پایین به بالا می‌رود کاهش می‌یابد. بنابراین، به چندین قسمت تقسیم می‌شود. هر قسمت دارای یک قالب خاص است که در آن فولاد تا دمای بسیار بالا (۲۵۰۰ درجه فارنهایت) گرم می‌شود و در قالب ثابت می‌شود تا شکل مورد نیاز را به‌دست آورد. دمای بالای مورد نیاز در این فرآیند، مصرف سوخت‌های فسیلی را در پی داشته و سبب انتشار آلاینده‌های زیادی می‌شود. پس از ریخته‌گری، تمام قطعات به هم جوش داده شده و سپس برای محافظت توسط روی پوشانده می‌شوند. فرایند جوشکاری سبب آزاد شدن آلاینده‌های مختلفی، از جمله اجزای ذرات معلق مانند سرب، نیکل، روی، اکسید آهن، مس، کادمیوم، فلوریدها، منگنز و کروم و گازهایی مانند مونوکسید کربن و اکسیدهای ازت می‌شود (Golbabaei & Khadem, 2015) که انتشار آن‌ها سلامت انسان را به خطر می‌اندازند.

کیفیت زیست‌بوم

نتایج بررسی اثرات زیست‌محیطی نشان داد که کیفیت اکوسیستم تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند اسیدی شدن محیط‌های آبی و خاکی، یوتریفیکاسیون، سمیت محیط‌های آبی و خاکی و تغییر کاربری زمین می‌باشد. نتایج نشان داد که تولید مواد اولیه و نصب تجهیزات نیازمند مقادیر زیادی فولاد و الکتریسیته (با منشا سوخت‌های تجدیدناپذیر) بوده و همچنین میزان آب زیادی نیز در این مراحل مصرف می‌گردد. فولاد در مرحله ریخته‌گری بسیار آبگیر بوده و این عامل سبب آلودگی محیطهای آبی و خاکی می‌شود. در حقیقت، اکثر فلزات سنگین و مواد مغذی حاصل از مصرف و احتراق سوخت‌ها می‌توانند با رسوب گرانشی و جذب شیمیایی به رسوبات سطحی منتقل شوند. بنابراین، فلزات سنگین و مواد مغذی یک منبع مضر و نامطلوب در محیط آبزی هستند (Peng *et al.*, 2020)، که در نتیجه منجر به مسمومیت آبزیان و محیطهای خاکی می‌گردند. عامل اصلی اسیدی شدن خاک در هر دو نیروگاه (آقکند: ۲/۶۴E−۰۵ و کهک: ۲/۰۱E−۰۵) مربوط به میزان آلومینیوم مصرفی در مرحله اولیه و تولید بود. بیشترین مقدار مس در سیم‌ها و کابل‌های نیروگاه و سیستم داخلی توربین استفاده می‌گردد که به نحوی با تولید و عبور الکتریسیته همراه است. همچنین بررسی شاخص اسیدی شدن محیطهای خاکی که عامل اثرگذار بر کیفیت اکوسیستم است نشان داد که فرآیند تولید فولاد (به‌جز آهن خام مذاب) که مقداری گوگرد غیرقابل جداسازی به‌صورت محلول در آن وجود دارد بنابراین فولاد کم‌آلیاژ علاوه بر این‌که انتشار SO_2 ندارد بلکه SO_2 در خود نگه می‌دارد. از این رو با بررسی نقش فولاد و چدن در ایجاد مسمومیت محیط‌های آبی مقادیر منفی، در نیروگاه آقکند ۶/۰۲E−۰۶ −، ۱/۲۳E−۰۶kgSO_2eq− و در نیروگاه کهک ۴/۷۱E−۰۶−، ۹/۴۷E−۰۷ kgSO_2eq− به‌ازای تولید یک کیلووات الکتریسیته به‌دست آمد. از طرف دیگر انتشارات آبی به دلیل خنک کردن فلزات با آب پس از اتمام پخت، ناشی می‌شود. طبق مطالعه‌ای در مرحله ساخت بتن و فلزات از یون نیکل برای جلوگیری از خوردگی و آلیاژهای مقاوم در برابر حرارت محصول استفاده می‌شود. یون نیکل موجود در این فرایند به آب‌ها منتقل می‌شود. نیکل به‌راحتی می‌تواند در زیستگاه، به‌ویژه در فیتوپلانکتون یا سایر گیاهان آبزی که به آلودگی آب حساس هستند، جمع شود و با رسوب کردن خود منجر به آلودگی آب گردد (Yuan *et al.*, 2021). بیش از ۹۰ درصد عناصر فلزی با ذرات معلق و رسوبات، از طریق جذب، پیچیدگی و بارش با آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از منابع فلزی احداث نیروگاه بادی ترکیب می‌شوند (Wang & Wang, 2015) و با نفوذ به منابع آبی سبب آلودگی آن می‌گردند.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که احداث نیروگاه‌های بادی به زمین با وسعت زیاد نیازمند است. بنابراین اشغال زمین (تغییر کاربری زمین) و از بین بردن محیط‌زیست آن منطقه از پیامدهای زیست‌محیطی احداث نیروگاه بادی است. بررسی‌ها نشان داد که فولاد کم‌آلیاژ، پرکاربردترین نهاده ورودی در ساخت توربین در دو نیروگاه (آقکند: ۳/۱۱E−۰۴ و کهک: ۲/۴۳E−۰۴) بود و به دلیل حجم و وزن زیاد، بخش عظیمی از کل پیامد اشغال اراضی (آقکند: ۵/۸۶E−۰۴ و کهک: ۴/۵۹E−۰۴) را به خود اختصاص داد. بتن مورد استفاده برای پی توربین‌ها نیز در دو نیروگاه (آقکند: ۳/۵۷E−۰۵ و کهک: ۲/۷۵E−۰۵) به اشغال اراضی منجر می‌شود. تجهیزات الکتریکی–الکترونیکی نیروگاه‌های بادی با سایزهای کوچک و بزرگ که در بخش‌های مختلف موجود و عملیات تولید و انتقال الکتریسیته را برعهده دارند نیز به افزایش پیامد اشغال اراضی در دو نیروگاه (آقکند: ۱/۸۳E−۰۵ و کهک: ۱/۴۲E−۰۵) منجر شد. چدن نیز در مرحله مواد اولیه و تولید (آقکند: ۳/۹۴E−۰۵ و کهک: ۳/۰۳E−۰۵) به دلیل وزن و حجم بالا، سبب افزایش این پیامد می‌گردد. حذف پوشش گیاهی طبیعی، تکه‌تکه شدن زیستگاه، اختلال در اکوسیستم و تهدید حیات‌وحش از جمله اثرات اشغال زمین است که در نتیجه‌ی احداث نیروگاه بادی در خشکی ایجاد می‌شود (Turkovska *et al.*, 2021).

در نهایت بررسی شاخص یوتریفیکاسیون در ایجاد دسته‌ی آسیب کیفیت اکوسیستم نشان داد که مرحله مواد اولیه و تولید، بیش از ۹۵ درصد این پیامد را به خود اختصاص داد و در این میان مس و تجهیزات الکتریکی–الکترونیکی بالاترین میزان مواد اولیه و تولید را دارا بودند. همچنین سوخت دیزل بیشترین بخش پیامد در مرحله‌ی نصب را به خود اختصاص داد و مرحله حمل‌ونقل و تعمیرو نگهداری، کمتر از ۱ درصد از این پیامد را شامل شد. بررسی‌ها نشان داد که مرحله تولید مواد اولیه بیشترین میزان انتشار دی‌اکسیدکربن به اتمسفر را دارا بود و با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در اتمسفر، احتمال شکوفایی جلبک‌ها افزایش می‌یابد و می‌توانند محیط‌های سمی را در آب ایجاد کرده و در نتیجه کیفیت آب را کاهش دهد (Paerl & Otten, 2013).

تغییر اقلیم

تغییرات اقلیم پیامد گرمایش جهانی بوده و هرچه مقدار دی‌اکسید کربن منتشرشده به جو بیشتر شود، دما و گرمایش جهانی افزایش می‌یابد (Raadal, Gagnon, Modahl, & Hanssen, 2011). نتایج نشان داد که مرحله مواد اولیه و تولید توربین‌ها در گرمایش جهانی، رتبه نخست را در نیروگاه آقکند و نیروگاه کهک به‌ترتیب با ۸۰ درصد و ۸۲ درصد را به خود اختصاص داد. فولاد کم‌آلیاژ، آلیاژ سنگین و آلومینیوم سه رتبه برتر انتشارات مرحله مواد اولیه و تولید را در برمی‌گیرند. تأثیر گرم شدن کره زمین عمدتاً از سوخت‌های فسیلی

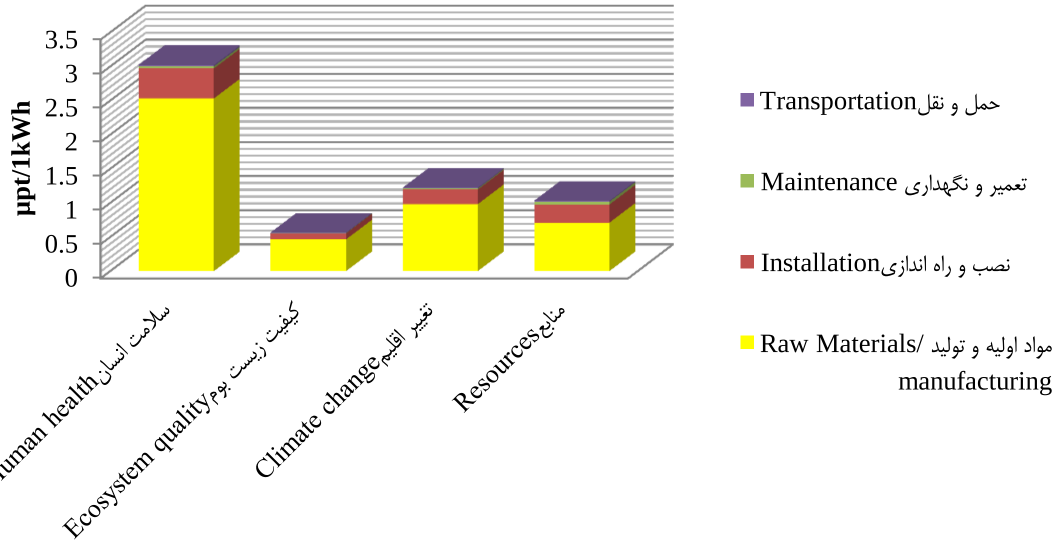
مصرف‌شده در هنگام ساخت انواع مختلف فولاد برای برج و ناسل و تیغه‌های روتور ناشی می‌شود. میزان الکتریسیته که در مرحله نصب و راه‌اندازی مصرف می‌شود، در نتیجه مصرف سوخت‌های فسیلی به‌دست‌آمده است که سبب افزایش گرمایش جهانی می‌شوند. مرحله حمل‌ونقل نیز رتبه سوم این پیامد را داشت. بخش حمل و نقل به علت استفاده از سوخت دیزل و انتشار دی‌اکسید کربن یکی از مهم‌ترین دلایل افزایش گرمایش جهانی در سطح جهان است. مرحله تعمیر و نگهداری با کمتر از ۱ درصد، کمترین میزان انتشار دی‌اکسید کربن در تمام مراحل احداث نیروگاه بادی را به خود اختصاص داد. رادال و همکاران (Raadal *et al.*, 2011) چرخه حیات انتشار گازهای گلخانه‌ای از منابع تجدیدپذیر و فناوری سوخت‌های فسیلی را مقایسه کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در مقایسه با فناوری‌های تولید الکتریسیته از منابع فسیلی، تولید برق با استفاده از نیروگاه بادی و نیروگاه آبی، سبب انتشار کمتر گازهای گلخانه‌ای شد.

نتایج نشان داد که در دسته‌ی اثرات زیست محیطی مربوط به تغییر اقلیم، استخراج مواد اولیه و تولید در نیروگاه آقکند و کهک به‌ترتیب با ۰۳-۹/۷۲E و ۰۳-۷/۵۴E، بیشترین مقدار را دارا بودند. مجموع انتشارات مربوط به تغییر اقلیم برای این دو نیروگاه نیز به‌ترتیب برابر ۰۲-۱/۲۱E و ۰۳-۹/۲۴E بود. نتایج پژوهشی بر روی اثرات زیست‌محیطی نیروگاه بادی و الکتریسیته‌آبی سفیدرود نشان داد که بیشترین انتشار آلاینده از توربین‌های بادی در مرحله تولید و ساخت توربین‌ها و بعد احداث نیروگاه بادی منجیل بوده است (Rezaei Kalaj & Oashk Sarai, 2014). گرچه حمل‌ونقل ۵۹٪ موجب مصرف سوخت فسیلی می‌گردد اما کمتر از ۳٪ به تغییرات آب و هوایی کمک می‌کند. بررسی پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از تولید الکتریسیته در نیروگاه‌های بادی در مقایسه با انرژی تولید شده از سوخت‌های فسیلی نشان داد که انتشار گازهای گلخانه‌ای در نیروگاه‌های بادی کمتر است، اما در نیروگاه‌های بادی نیز همچنان برخی از گازهای گلخانه‌ای ساطع می‌شوند که بیشتر آن‌ها از تولید بتن و فولاد برای پایه‌های توربین بادی ناشی می‌شود. این نتایج با نتایج تحقیق وانگ و وانگ (Wang & Wang, 2015) مطابقت دارد.

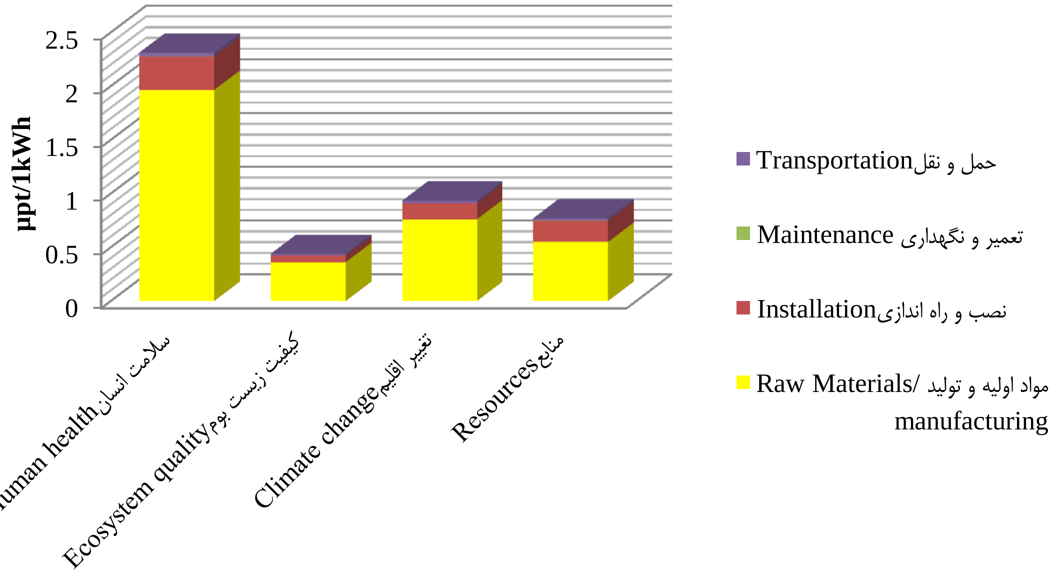
منابع

دسته‌ی اثرات زیست‌محیطی آسیب به منابع، تحت تاثیر دو عامل مهم مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر و استخراج مواد معدنی است. بررسی شاخص میزان مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر نشان داد که مرحله مواد اولیه و تولید توربین در نیروگاه آقکند با سهم ۶۸ درصد و در نیروگاه کهک با سهم ۷۰ درصد، بیشترین اثر را بر دسته‌ی آسیب به منابع داشتند. همچنین مرحله نصب و راه‌اندازی به دلیل استفاده از سوخت دیزل، دومین عامل موثر بر دسته‌ی آسیب به منابع بود. این نتایج دلیل خوبی برای سوق دادن جوامع به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است. بررسی مرحله تعمیر و نگهداری نشان داد که میزان مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر در نیروگاه آقکند MJ primary ۰۳-۶/۲۳E و در نیروگاه کهک MJ primary ۰۴-۲/۴۰E بود که این اختلاف در دو نیروگاه، به دلیل میزان الکتریسیته تولیدی بالاتر در نیروگاه کهک بود بنابراین نشان‌دهنده این امر است که هرچه الکتریسیته تولیدی نیروگاهی بیشتر باشد میزان مصرف انرژی به‌ازای یک کیلووات الکتریسیته تولیدی در آن کمتر می‌گردد. همچنین بررسی شاخص استخراج مواد معدنی نشان داد که تقریبا صد درصد این پیامد مربوط به مرحله‌ی مواد اولیه و تولید توربین است. دلیل این امر آن است که برای ساخت توربین از موادی همچون فولاد، چدن، آلومینیوم، پلیمر، مس و غیره استفاده شده است که به‌دست آوردن هرکدام از این مواد نیازمند استخراج اجزای آن‌ها از معادن می‌باشد. بررسی‌ها نشان داد که سهم مرحله نصب و حمل‌ونقل و نگهداری در مقایسه با مرحله تولید تقریبا صفر درصد بوده و دلیل آن این است که نسبت پیامدهای سوخت فسیلی و روغن استفاده شده در این مراحل با پیامدهای مواد ورودی مرحله تولید که اکثرا متشکل از فلزات است قابل قیاس نیست. چو و همکاران با بررسی اثرات زیست‌محیطی یک نیروگاه بادی به این نتیجه رسیدند که اثرات زیست‌محیطی نسبتا زیاد در دسته‌ی آسیب به منابع، ناشی از استفاده از مواد اولیه و سوخت بود همچنین فرآیند تولید فولاد مقدار زیادی سوخت مصرف کرد و در نتیجه منجر به آسیب منابع شد (Chu, Zhao, Li, Fan, & Qin, 2017).

بررسی‌ها نشان داد که سهم تولید مواد اولیه در هر دو نیروگاه آقکند و کهک بیش از ۷۰ درصد از اثرات زیست‌محیطی مربوط به دسته‌ی آسیب به منابع را به خود اختصاص داد. نتایج پژوهش الصالح و ستلر (Alsaleh & Sattler, 2019) در بررسی اثرات زیست‌محیطی توربین‌های بادی بزرگ ساحلی نشان داد که مرحله تولید بیشترین اثرات بر دسته خسارات از جمله منابع را داشت و بعد از آن نصب، حمل‌ونقل و نگهداری به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.



شکل ٦– دسته خسارات زیست‌محیطی در نیروگاه اقکند در تمام مراحل چرخه حیات در طول عمر ۲۰ سال
Fig.6. Environmental damage in the Aqkand power plant at all stages of the life cycle during the life of 20 years



شکل ۷– دسته خسارات زیست‌محیطی در نیروگاه کهک در تمام مراحل چرخه حیات در طول عمر ۲۰ سال
Fig.7. Environmental damage in Kahak power plant at all stages of the life cycle during the life of 20 years

مقایسه رده‌های آسیب در دو نیروگاه آقکند و کهک در دوره‌های زمانی مختلف

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مقدار کل آلاینده‌های زیست‌محیطی دو نیروگاه بادی آقکند و کهک در دوره ۲۰ ساله برای ۱ کیلوات ساعت الکتریسیته تولیدی به‌ترتیب برابر ۵/۸۴ و ۴/۴۵ (μPt kWh^{-1}) بود و از این مقدار به‌ترتیب ۳/۰۲ و ۲/۳۱ (μPt kWh^{-1}) به دسته‌ی خسارت سلامت انسان اختصاص داشت. سهم مواد اولیه و تولید، نصب و راه‌اندازی، تعمیر و نگهداری و حمل‌ونقل در نیروگاه آقکند به‌ترتیب ۸۰/۲۳، ۱۷/۲۵، ۱/۵۲ و ۱ درصد و در نیروگاه کهک به‌ترتیب ۸۱/۷۲، ۱۶/۲۷، ۰/۰۸ و ۱/۹۳ درصد از مقدار کل آسیب‌های زیست‌محیطی بود. از میان دسته‌ی خسارات مورد مطالعه، سلامت انسان در دو نیروگاه آقکند و کهک به‌ترتیب با ۵۱/۷۲ و ۵۱/۸۹ درصد، دسته اصلی انتشارات زیست‌محیطی بود. تغییر اقلیم در نیروگاه‌های آقکند و کهک به‌ترتیب با ۲۰/۹۲ و ۲۰/۹۶

درصد و منابع به‌ترتیب با ۱۷/۶۷و۱۷/۳۰ درصد در رده‌های دوم و سوم قرار داشتند.

بررسی دسته‌ی خسارات در دو نیروگاه آقکند و کهک در دوره زمانی ۲۰، ۲۵ و ساله (جدول ۴) نشان داد که میزان دسته‌های آسیب با افزایش طول عمر نیروگاه‌ها روند کاهشی داشت. بررسی‌ها در طول ۲۵ تا ۳۰ سال نسبت به ۲۰ سال طول عمر نشان داد که منابع لازم از جمله تعویض روغن توربین‌ها و همچنین عملیات نگهداری و تعمیرات برای حفظ کارکرد مفید توربین هر ۴ ماه یکبار مورد نیاز بود، در حالی‌که در شرایط کمتر از ۲۰ سال این دوره به ۶ ماه رسید. بررسی‌های میدانی نشان داد که در هر سال ۲ تا ۳ سفر اضافی به توربین‌ها برای انجام خدمات نگهداری وجود دارد. بنابراین، منابع بیشتری از جمله آب مورد نیاز است. عملیات‌های ذکرشده شامل حمل و نقل به نیروگاه‌ها و برگشت از آن‌ها می‌باشد که در این شرایط مصرف دیزل، بنزین و غیره افزایش می‌یابد. براساس مطالعه الصالح و ستلر (Alsaleh & Sattler, 2019)، عمر طولانی‌تر توربین‌ها ممکن است راهی برای افزایش درآمد باشد، اما سبب افزایش تعمیر و نگهداری می‌شود. دلیل این امر آن است که قسمت‌های مختلف توربین مسن‌تر از حد معمول، دارای قطعات فرسوده‌تر بوده و نیازمند نگهداری و تعمیرات بالاتری می‌باشد.

جدول ۵- دسته خسارات نیروگاه آقکند و کهک در سه طول عمر مختلف نیروگاه

Table 5- Damage categories and values for Aqkand and Kahak power plants in three different lifetimes

دسته خسارات Damage category	واحد Unit	آقکند Aqkend ۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years	کهک Kahak ۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years
سلامت انسان Human health	µPt	3.02E+00	2.44E+00	2.05E+00	2.31E+00	1.85E+00	1.54E+00
کیفیت زیستبوم Ecosystem quality	µPt	5.67E-01	4.58E-01	3.83E-01	4.38E-01	3.51E-01	2.92E-01
تغییر اقلیم Climate change	µPt	1.22E+00	9.90E-01	8.29E-01	9.33E-01	7.46E-01	6.22E-01
منابع Resources	µPt	1.03E+00	8.57E-01	7.26E-01	7.70E-01	6.16E-01	5.13E-01

ارزیابی شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی

بررسی شاخص‌های مختلف در تقاضای اکسرژی تجمعی برای تولید یک کیلووات ساعت الکتریسته تولیدی در دو نیروگاه آقکند و کهک نشان داد که شاخص‌های ایجادشده در نیروگاه آقکند بالاتر از نیروگاه کهک بود. همچنین نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۵ نشان داد که منابع تجدیدپذیر-فسیلی بیشترین تقاضای اکسرژی تجمعی را برای تولید یک کیلووات برق تولیدی از هر دو نیروگاه احداث شده به خود اختصاص دادند. بررسی‌ها نشان داد که سهم به‌سزایی از ایجاد شاخص‌های تجدیدناپذیر-فسیلی، تجدیدپذیر-زیست‌توده، تجدیدناپذیر-فلزات مربوط به مرحله مواد اولیه و تولید بود. از طرفی دیگر بخش قابل‌توجهی از CExD متعلق به تجدیدناپذیر-فسیلی است، که مصرف دیزل یکی از اجزای اصلی در فرآیندهای مختلف راه‌اندازی نیروگاه (شامل مرحله تولید، نصب و راه‌اندازی، حمل و نقل و نگهداری و تعمیرات) است. همچنین استفاده از سوخت‌ها و روغن‌ها در تهیه فلزات مختلف منجر به مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر-فسیلی، فلزات و مواد معدنی شد. بررسی‌ها نشان داد که استفاده از ورودی‌های بالاو منابع فسیلی در معرض خطر قرار خواهند گرفت. کنترل میزان استفاده از سوخت‌های فسیلی در مرحله مواد اولیه و تولید توربین بسیار ضروری است. کمترین میزان مصرف انرژی در استخراج مواد اولیه و تولید توربین مربوط به تجدیدپذیر-جنبشی بود، زیرا استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح وسیع و صنعتی ایران مخصوصا در کارخانه‌های تولید اجزای توربین بسیار پایین است و انرژی‌های تجدیدناپذیر هنوز هم سهم بالایی از مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی اثرات زیست‌محیطی و تقاضای اکسرژی تجمعی تولید الکتریسته در نیروگاه‌های بادی کهک و آقکند در طول سه دوره عمر ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سال پرداخته شد. نتایج نشان داد که مرحله استخراج مواد اولیه و تولید در دو نیروگاه حدود ۷۰٪ در ایجاد انواع اثرات تنفسی، ۶۰٪ در ایجاد پتانسیل سلامتی انسان، ۲۵٪ در ایجاد گروه‌های اسیدی شدن و گرم شدن کره زمین اثرگذار بود.

جدول ٦- تقاضای اکسرژی نیروگاه آقکند و کهک در سه طول عمر مختلف نیروگاه

Table 6- Exergy demand of Aqkand and Kahak power plants in three different lifetimes

شاخص‌های اکسرژی **Exergy categories**	**واحد** **Unit**	**آقکند Aqkend** **۲۰ سال** **20Years**	**۲۵ سال** **25 Years**	**۳۰ سال** **30 Years**	**کهک Kahak** **۲۰ سال** **20 Years**	**۲۵ سال** **25 Years**	**۳۰ سال** **30 Years**
تجدیدناپذیر-فسیلی Non-renewable, fossil	MJ	1.53E-01	1.27E-01	1.08E-01	1.14E-01	9.09E-02	7.58E-02
تجدیدناپذیر-هسته‌ای Non-renewable, nuclear	MJ	2.97E-05	-7.98E-06	-1.85E-05	-1.94E-05	-1.55E-05	-1.29E-05
تجدیدپذیر-جنبشی Renewable, kinetic	MJ	-4.36E-03	-3.56E-03	-3.00E-03	-3.32E-03	-2.66E-03	-2.21E-03
تجدیدپذیر-خورشیدی Renewable, solar	MJ	5.33E-06	4.59E-06	3.95E-06	4.03E-06	3.22E-06	2.68E-06
تجدیدپذیر-پتانسیل Renewable, potential	MJ	6.79E-03	5.42E-03	4.51E-03	5.14E-03	4.11E-03	3.43E-03
تجدیدناپذیر-اولیه Non-renewable, primary	MJ	1.17E-03	9.38E-04	7.82E-04	9.13E-04	7.30E-04	6.09E-04
تجدیدپذیر-زیست‌توده Renewable, biomass	MJ	1.43E-02	1.17E-02	9.81E-03	1.10E-02	8.79E-03	7.32E-03
تجدیدپذیر-آبی Renewable, water	MJ	3.43E-03	2.71E-03	2.25E-03	2.66E-03	2.13E-03	1.77E-03
تجدیدناپذیر-فلزات Non-renewable, metals	MJ	2.81E-02	2.26E-02	1.88E-02	2.19E-02	1.75E-02	1.46E-02
تجدیدناپذیر-مواد معدنی Non-renewable, minerals	MJ	2.23E-03	1.80E-03	1.50E-03	1.73E-03	1.39E-03	1.16E-03

همچنین مرحله نصب تجهیزات در نیروگاه آقکند ۱۷٪ و در نیروگاه کهک ۱۶٪ در ایجاد تغییرات آب و هوایی و بین ۱۴ تا ۲۶٪ در ایجاد سایر گروه‌های زیست‌محیطی اثرگذار بود. مرحله‌ی تعمیر و نگهداری شامل رانندگی بین توربین‌ها دو بار در سال برای روان‌کاری، تعویض قطعات و بازرسی آن‌ها می‌شود، که اثرات آن برای همه دسته‌ها کمتر از ۸٪ در هر دو نیروگاه محاسبه شد. مرحله‌ی حمل‌ونقل به دلیل مصرف سوخت دیزل، در نیروگاه آقکند ۳٪ و نیروگاه کهک ۶٪ به تخریب لایه ازن کمک می‌کند. ارزیابی دسته‌ی خسارات مربوط به دسته‌ی سلامت انسان نشان داد که استخراج مواد اولیه و تولید در نیروگاه آقکند به میزان DALY ۱/۰۸E-۰۸ و در نیروگاه کهک با DALY ۱/۳۹E-۰۸ بیشترین اثرات را دارا بودند. همچنین میزان کل انتشارات زیست‌محیطی در دسته‌ی کیفیت زیست‌بوم در نیروگاه آقکند PDF*m2*yr ۷/۷۶E-۰۳ و در نیروگاه کهک ۶/۰۰E-۰۳PDF[1]*m^2*yr بود. بررسی تغییرات شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی نشان داد که بخش قابل‌توجهی از این شاخص متعلق به انرژی تجدیدناپذیر-فسیلی از جمله مصرف سوخت دیزل بود که به‌عنوان یکی از منابع اصلی مصرفی در فرآیندهای مختلف راه‌اندازی نیروگاه (شامل مرحله تولید، نصب و راه‌اندازی، حمل و نقل، نگهداری و تعمیرات) مصرف بالایی داشت. حساسیت افزایش طول عمر نیروگاه‌ها نشان داد که افزایش عمر توربین سبب کاهش اثرات زیست‌محیطی و شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی به‌ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی گردید. با افزایش طول عمر اثرات زیست‌محیطی مرحله‌ی حمل‌ونقل و تعمیر و نگهداری افزایش یافت. با افزایش ۵ تا ۱۰ سال عمر توربین‌ها، منابع لازم برای حفظ توربین‌ها حداکثر هر شش ماه مورد استفاده قرار گرفته و روند فازهای حمل‌ونقل و تعمیر و نگهداری رو به افزایش بود.

1- Potentially Disappeared Fraction of Species

PDF*m^2*year: انتشار ۱ برابر است با ناپدید شدن همه گونه‌ها از ۱ مترمربع در طول ۱ سال، یا ناپدید شدن ۱۰٪ گونه‌ها از ۱ مترمربع در طول ۱۰ سال، یا ناپدید شدن ۱۰٪ از گونه‌ها از ۱۰ مترمربع در طول ۱ سال.

پیشنهادات

در مطالعات آینده می‌توان علاوه بر پارامترهای زیست‌محیطی سایر پارامترهای تولید پایدار مانند هزینه/اقتصادی و اجتماعی هم بررسی شود تا بتوان تصمیم‌گیری کلان‌تری برای احداث و نگهداشت نیروگاه‌ها در کشور گرفت. مطالعات آینده می‌توانند با همکاری شرکت‌های بازیافت در این زمینه، اثرات زیست‌محیطی فاز دفع را نیز مدنظر بگیرند. مدل ارزیابی چرخه حیات در این تحقیق IMPACT2002+ می‌باشد اما می‌توان از دیگر مدل‌های ارزیابی چرخه حیات مانند ILCD یا Recipe یا TRACI در مباحث زیست‌محیطی استفاده شده و نتایج حاصله با نتایج این تحقیق مقایسه شود. همچنین پیشنهاد می‌شود توربین‌ها با ظرفیت متفاوت و حتی بیشتر مورد تجزیه و تحلیل قرار بگیرد و میزان انتشارات با کاهش یا افزایش ظرفیت مقایسه گردد.

References

1. Aghahosseini, A., Bogdanov, D., Ghorbani, N., & Breyer, C. (2018). Analysis of 100% renewable energy for Iran in 2030: integrating solar PV, wind energy and storage. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *15*, 17-36. https://doi.org/10.1007/s13762-017-1373-4
2. Al-Muhammad, S., & Piriaei, M. (2013). Use life cycle assessment to compare greenhouse gas emissions from power plants. Third Conference on Environmental Planning and Management. University of Tehran, Iran.
3. Alsaleh, A., & Sattler, M. (2019). Comprehensive life cycle assessment of large wind turbines in the US. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *21*, 887-903. https://doi.org/10.1007/s10098-019-01678-0
4. Amani, A., & Hosseini Shamachi, A. (2009). The study of wind energy in the stations of the catchment area of the South Aras River. *Journal of Geographical Space*, *10*, 1-26. (In Persian).
5. Azarpour, A., Suhaimi, S., Zahedi, G., & Bahadori, A. (2013). A review on the drawbacks of renewable energy as a promising energy source of the future. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *38*, 317-328. https://doi.org/10.1007/s13369-012-0436-6
6. Bidstrup, M. (2015). Life cycle thinking in impact assessment—Current practice and LCA gains. *Environmental Impact Assessment Review*, *54*, 72-79. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.05.003
7. Billinton, R., & Gao, Y. (2008). Multistate wind energy conversion system models for adequacy assessment of generating systems incorporating wind energy. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *23*, 163-170 https://doi.org/10.1109/tec.2006.882415
8. Bösch, M. E., Hellweg, S., Huijbregts, M. A., & Frischknecht, R. (2007). Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *12*, 181-190. https://doi.org/10.1065/lca2006.11.282
9. British, P. (2006). BP Statistical Review of World Energy. Retrieved from: https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf. Accessed 2020
10. Chipindula, J., Botlaguduru, V. S. V., Du, H., Kommalapati, R. R., & Huque, Z. (2018). Life cycle environmental impact of onshore and offshore wind farms in Texas. *Sustainability*, *10*, 2022. https://doi.org/10.3390/su10062022
11. Chu, Z., Zhao, T., Li, L., Fan, J., & Qin, Y. (2017). Characterization of antimicrobial poly (lactic acid)/nano-composite films with silver and zinc oxide nanoparticles. *Materials*, *10*, 659. https://doi.org/10.3390/ma10060659
12. Dewulf, J., Bösch, M. E., De Meester, B., Van der Vorst, G., Van Langenhove, H., Hellweg, S., & Huijbregts, M. A. J. (2007). Cumulative exergy extraction from the natural environment (CEENE): a comprehensive life cycle impact assessment method for resource accounting. *Environmental Science & Technology*, *41*, 8477-8483. https://doi.org/10.1021/es0711415
13. Gkantou, M., Rebelo, C., & Baniotopoulos, C. (2020). Life cycle assessment of tall onshore hybrid steel wind turbine towers. *Energies*, *13*, 3950. https://doi.org/10.3390/en13153950
14. Golbabaei, F., & Khadem, M. (2015). Air pollution in welding processes—assessment and control methods. *Current Air Quality Issues*, 33-63. https://doi.org/10.5772/59793
15. Guinée, J. B., & Lindeijer, E. (2002). Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards. Springer Science & Business Media.
16. Guleria, R., Bhushan, B., Guleria, A., Bhushan, A., & Dulari, P. (2019). Harmful effects of ionizing radiation. I*nternational Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, *7*, 887-889. https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.12141
17. Haapala, K. R., & Prempreeda, P. (2014). Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, *3*(2), 170-185. https://doi.org/10.1504/ijsm.2014.062496
18. Hendrickson, C. T., Lave, L. B., & Matthews, H. S. (2010). *Environmental life cycle assessment of goods and services: an input-output approach*. Routledge. https://doi.org/10.4324/9781936331383
19. Jolliet, O., Antón, A., Boulay, A., Cherubini, F., Fantke, P., Levasseur, A., McKone, T. E., Michelsen, O., Canals,

L. M., Motoshita, M., Pfister, S., Verones, F., Vigon, B., & Frischknecht, R. (2018). Global guidance on environmental life cycle impact assessment indicators: impacts of climate change, fine particulate matter formation, water consumption and land use. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *23*, 2189-2207. https://doi.org/10.1007/s11367-018-1443-y

20. Joseph, V. S., Lucille, L., & Bruce, H. (2000). Greenhouse Gas Emissions of Electricity Generation Chain. IAEA Bulletin 42
21. Konstantinos, V., Karras, Y., Kohlhammer, J., Steiger, M., Tzovaras, D., & Gounopoulos, E. (2014). *Enhanced Visual Analytics Services for the Optimal Planning of Renewable Energy Resources Installations*. Pages 330-339. IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations: Springer.
22. Kouloumpis, V., Sobolewski, R. A., & Yan, X. (2020). Performance and life cycle assessment of a small scale vertical axis wind turbine. *Journal of Cleaner Production*, *247*, 119520. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119520
23. Le Gourieres, D. (2014). Wind power plants: theory and design. Elsevier.
24. Li, H., Jiang, H. D., Dong, K. Y., Wei, Y. M., & Liao, H. (2020). A comparative analysis of the life cycle environmental emissions from wind and coal power. *Evidence from China. Journal of Cleaner Production*, *248*, 119192 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119192
25. Martínez, E., Latorre-Biel, J., Jiménez, E., Sanz, F., & Blanco, J. (2018). Life cycle assessment of a wind farm repowering process. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *93*, 260-271. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.044
26. Moore, J. (2021). A Comparison of the Environmental Effects of Renewable and Non-Renewable Energies.
27. Motahari, A., Ahmadian, M., Abedi, Z., & Ghaffarzadeh, H. (2014). Economic evaluation of wind power plants in Iran considering the effect of energy price liberalization policy. *Iranian Journal of Energy Economics (Environmental and Energy Economics)*, *3*, 179-200. (In Persian).
28. Paerl, H. W., & Otten, T. G. (2013). Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls. *Microbial Ecology*, *65*, 995-1010. https://doi.org/10.1007/s00248-012-0159-y
29. Peng, C., Shen, Y., Wu, X., Yuan, P., Jiang, L., Chen, S., Ze, S., Wang, X., & Song, X. (2020). Heavy metals, nitrogen ,and phosphorus in sediments from the first drinking water reservoir supplied by Yangtze River in Shanghai, China: Spatial distribution characteristics and pollution risk assessment. *Water, Air, & Soil Pollution*, *231*, 1-15. https://doi.org/10.1007/s11270-020-04651-6
30. Raadal, H. L., Gagnon, L., Modahl, I. S., & Hanssen, O. J. (2011). Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power. R*enewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*, 3417-3422. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.001
31. Rezaei Kalaj, S., & Oashk Sarai, L. (2014). *Investigation of environmental effects of electricity generation technologies (Case study of Manjil wind and hydropower plant)*. The Second National and Specialized Conference on Environmental Research in Iran. Hamedan, Hegmataneh Association of Environmental Assessors. (In Persian).
32. Saber, Z., Esmaeili, M., Pirdashti, H., Motevali, A., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2020). Exergoenvironmental-Life cycle cost analysis for conventional, low external input and organic systems of rice paddy production. *Journal of Cleaner Production*, *263*, 121529. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121529
33. Solomon, K. R. (2008). Effects of ozone depletion and UV-B radiation on humans and the environment. *Atmosphere-Ocean*, *46*, 185-202. https://doi.org/10.3137/ao.460109
34. Standardization, I. O. F. (2006). Environmental management: life cycle assessment; Principles and Framework. ISO.
35. Statistical, I. (2019). Annual statistical report of iran water and electricity industry, Statistical reports of water and electricity, Ministry of Energy. Retrieved from: https://isn.moe.gov.ir
36. Stavridou, N., Koltsakis, E., & Baniotopoulos, C. (2020). *Life Cycle Analysis of lattice and tubular wind turbine towers. A comparative study*. Pages 012071. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012071.
37. Teffera, B., Assefa, B., Björklund, A., & Assefa, G. (2021). Life cycle assessment of wind farms in Ethiopia. The *International Journal of Life Cycle Assessment*, *26*, 76-96. https://doi.org/10.1007/s11367-020-01834-5
38. Turkovska, O., Castro, G., Klingler, M., Nitsch, F., Regner, P. Soterroni, A. C. & Schmidt, J. (2021). Land-use impacts of Brazilian wind power expansion. *Environmental Research Letters*, *16*, 024010. https://doi.org/10.5281/zenodo.4013396
39. Wang, S., & Wang, S. (2015). Impacts of wind energy on environment: A review. Renewable and Sustainable. *Energy Reviews*, *49*, 437-443. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.137
40. Wang, L., Wang, Y., Du, H., Zuo, J., Li, R. Y. M., Zhou, Z., ... & Garvlehn, M. P. (2019). A comparative life-cycle assessment of hydro-, nuclear and wind power: A China study. *Applied Energy*, *249*, 37-45. https://doi.org/1/0,1016/j.apenergy.2019.04.099
41. Wang, S., Wang, S., & Liu, J. (2019). Life-cycle green-house gas emissions of onshore and offshore wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, *210*, 804-810. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.031

42. Xu, L., Pang, M., Zhang, L., Poganietz, W. R., & Marathe, S. D. (2018). Life cycle assessment of onshore wind power systems in China. *Resources, Conservation and Recycling*, *132*, 361-368 https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.014
43. Yuan, C., Bai, X., Zhu, T., Wen, Z., Cao, T., Zhang, X., & Ni, L. (2021). Long-Term Effects of the Harvesting of Trapa natans on Local Water Quality and Aquatic Macrophyte Community in Lake Erhai, China. *Frontiers in Environmental Science*, *9*, 246. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.706746
44. Zare Thani, H., & Nisari, P. (2016). *Wind energy and its life cycle evaluation*. 10th National Congress of Agricultural Machinery Engineering (Biosystems) and Mechanization of Iran .Mashhad, Iran. (In Persian).